

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dominik Grubišić

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

HIBRIDNO ORC POSTROJENJE

Mentori:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar, dipl. ing.

Student:

Dominik Grubišić

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Draženu Lončaru na pomoći i strpljenju, a posebice zahvaljujem obitelji, prijateljima, mag.ing. Anti Marušiću te svojoj djevojci.

Dominik Grubišić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa	
Urbroj	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Domink GRUBIŠIĆ**

Mat. br.: 0035191610

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: **IIIBRIDNO ORC POSTROJENJE**

Naslov rada na
engleskom jeziku: **IIYBRID ORC PLANT**

Opis zadatka:

Razvoj nove generacije energetskih postrojenja usmjeren je k modularnim izvedbama prikladnim za velikoserijsku proizvodnju i primjenu u manjim stambenim i poslovnim objektima za pokrivanje različitih energetskih potreba i uz maksimalno iskorištavanje obnovljivih energetskih izvora. Sve popularniji koncept tzv. *nula energetske kuće* primjer je korištenje različitih modularnih sustava s ciljem postizanja potpune energetske neovisnosti objekta. Jedan od zanimljivijih primjera je i hibridna izvedba dizalice topline (DT) i organskog Rankincovog ciklusa (ORC) sa solarnim kolektorom kao izvorom topline. Opseg korištenja navedenog sustava još uvijek je ograničen na eksperimentalna ispitivanja koja bi se značajno mogla proširiti razvojem detaljnijih modela na temelju dostupnih eksperimentalnih podataka.

U okviru rada potrebno je:

1. Za niskoenergetski stambeni objekt površine 400 m² dimenzionirati hibridno ORC/DT postrojenje koje će ovisno o režimu rada kao izvor odnosno ponor topline koristiti solarni kolektor odnosno bušotinski izmjenjivač,
2. Izvesti pojednostavljeni matematički model spremnika topline i bušotinskog izmjenjivača te napraviti kvazistacionarni model ORC i DT sustava,
3. Simulirati dnevni tijek za različite režime rada i ispitati mogućnost interakcije DT i ORC kroz bušotinski izmjenjivač kao spremnik topline.

U tekstu završnog rada potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć pri izradi.


Zadatok zadan:
30. studenog 2016.

Rok predaje rada:
1. rok: 24. veljače 2017.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
3. rok: 17. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 27.2. - 01.03. 2017
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017
3. rok: 23.9. - 29. 09. 2017

Zadatok zdao:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Organski Rankineov ciklus (ORC).....	1
2. PROMATRANO HIBRIDNO POSTROJENJE.....	5
2.1. Opis postrojenja	5
2.2. Spremnik topline	6
2.3. Solarni toplinski kolektor	10
2.4. Izmjena režima	13
3. MATEMATIČKI MODEL HIBRIDNOG ORC POSTROJENJA	15
3.1. Bilanca energije stambenog prostora	16
3.2. Bilanca energije kruga solarnog kolektora.....	17
3.3. Bilanca energije kruga ponora topline	20
4. REZULTATI SIMULACIJE	25
4.1. Odziv postrojenja u prijelaznom razdoblju	25
4.1.1. Odziv kruga ponora topline u DT režimu	29
4.1.2. Odziv kruga ponora topline u ORC režimu	30
4.2. Rezultati s promjenjenom donjom graničnom temperaturom spremnika (ϑ_{donja}).....	34
4.3. Usporedba rezultata dobivenih za mjesec srpanj	35
5. ZAKLJUČAK.....	37
LITERATURA.....	38

POPIS SLIKA

Slika 1. Shematski prikaz Rankineovog ciklusa [2]	2
Slika 2. Prikaz realnog Organskog Rankineovog ciklusa u Ts-dijagramu [2]	3
Slika 3. Shematski prikaz ORC režima[4]	5
Slika 4. Shematski prikaz DT režima [4]	6
Slika 5. Spremnik topline [6]	9
Slika 6. Profil dnevnog dozračivanja	11
Slika 7. Dnevni profil temperature okoliša	12
Slika 8. Ts-dijagram ORC režima	13
Slika 9. Ts-dijagram DT režima	14
Slika 10. Solarni kolektor	18
Slika 11. Temperature organskog medija i toplinskog medija u isparivaču	19
Slika 12. Shematski prikaz kondenzatora	21
Slika 13. Spremnik topline i pripadajuće temperature	22
Slika 14. Prikaz j bušotinskog izmjenjivača.....	23
Slika 15. Ovisnost toplinskog dobitka o okolišnim uvjetima.....	25
Slika 16. Temperatura spremnika.....	26
Slika 17. Protoci solarnog i ORC kruga	27
Slika 18. Ulazne i izlazne temperature medija u isparivaču	28
Slika 19. Dinamika protoka toplinskog medija	28
Slika 20. Dinamika procesa unutar spremnika topline.....	29
Slika 21. Odziv tla za segment cijevi j=1	30
Slika 22. Odziv tla za segment cijevi j=2.....	30
Slika 23. Odziv tla za segment cijevi j=3	31
Slika 24. Otvorenost vetnila	32
Slika 25. Regulirana sobna temperatura.....	32
Slika 26. Utrošena/dobivena snaga sustava.....	33
Slika 27. Utrošak/dobitak snage s promjenjenom ϑ_{donja}	34
Slika 28. Dinamika u spremniku s promjenjenom ϑ_{donja}	34
Slika 29. Dinamika spremnika topline s promijenjenim okolišnim uvjetima	35
Slika 30. Utrošena/dobivena snaga postrojenja u mjesecu srpnju	35

POPIS TABLICA

Tablica 1. Faktori utjecaja na okoliš organskih fluida	4
Tablica 2. Podaci o izmjenjivačkim površinama u spremniku topline	9
Tablica 3. Specifikacije vakuumskog kolektora Vitosol 200-T, tip SD2.....	11

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ϑ_{donja}	°C	Donja granična temperatura toplinskog spremnika
$\vartheta_{\text{gornja}}$	°C	Gornja granična temperatura toplinskog spremnika
ϑ_{int}	°C	Temperatura u stambenom prostoru
ϑ_{ok}	°C	Temperatura okolišnog zraka
ϑ_{pov}	°C	Temperatura povratnog ogrjevnog medija
ϑ_{pol}	°C	Temperatura polaznog ogrjevnog medija
$\vartheta_{\text{isp},2}$	°C	Temperatura organskog medija na izlazu iz isparivača
$\vartheta_{\text{isp},1}$	°C	Temperatura organskog medija na ulazu u isparivača
$\vartheta_{\text{isp},2,\text{ORC}}$	°C	Temperatura organskog medija na izlazu iz isparivača pri ORC režimu
$\vartheta_{\text{isp},1,\text{ORC}}$	°C	Temperatura organskog medija na ulazu u isparivač pri ORC režimu
$\vartheta_{\text{isp},2,\text{dt}}$	°C	Temperatura organskog medija na izlazu iz isparivača pri ORC režimu
$\vartheta_{\text{isp},1,\text{dt}}$	°C	Temperatura organskog medija na ulazu u isparivač pri DT režimu
$\vartheta_{\text{zas,isp}}$	°C	Temperatura isparavanja
$\vartheta_{\text{zas,kond}}$	°C	Temperatura kondenzacije
$\vartheta_{\text{g},2}$	°C	Temperatura toplinskog medija na izlazu iz kondenzatora
$\vartheta_{\text{g},1}$	°C	Temperatura toplinskog medija na ulazu u kondenzator
ϑ_{scr}	°C	Temperatura organskog medija na izlazu iz kompresora
ϑ_{poth}	°C	Temperatura pothlađenog organskog medija
$\vartheta_{\text{j},i}$	°C	Temperatura j,i segmenta tla
E	J	Toplinska energija akumulirana u promatranom sustavu
e_u	W	Toplinski tok koji ulazi u sustav kroz njegovu granicu
e_i	W	Toplinski tok koji ulazi u sustav kroz njegovu granicu
E_{zrak}	J	Toplinska energija akumulirana u zraku stambenog prostora
E_{kol}	J	Toplinska energija akumulirana u volumenu solarnih kolektora
E_{spr}	J	Toplinska energija akumulirana u vodi u spremniku topline
E_{ptv}	J	Toplinska energija akumulirana u volumenu cijevi za PTV
E_{izm}	J	Toplinska energija akumulirana u volumenu izmjenjivača
$E_{\text{j},i}$	J	Toplinska energija akumulirana u j,i segmentu tla
$E_{\text{j},\text{izl}}$	J	Toplinska energija akumulirana u j segmentu cijevi
M_{zrak}	kg	Masa zraka u stambenom prostoru
M_{kol}	kg	Masa toplinskog fluida u kolektoru
M_{spr}	kg	Masa vode u spremniku topline
M_{ptv}	kg	Masa vode u PTV cijevi
M_{izm}	kg	Masa vode u volumenu izmjenjivača

$M_{tlo,i}$	kg	Masa i segmenta tla
M_{bit}	kg	Masa unutar svakog segmenta cijevi bušotinskog izmjenjivača
m_{og}	kg/s	Maseni protok kroz ogrjevno tijelo
m_{sol}	kg/s	Maseni protok kruga solarnog kolektora
m_g	kg/s	Maseni protok kruga toplinskog ponora
m_{org}	kg/s	Maseni protok organskog fluida
m_{ptv}	kg/s	Maseni protok PTV
m_{bit}	kg/s	Maseni protok toplinskog medija u bušotinskom izmjenjivaču
Φ_i	W	Toplinski gubitak stambenog prostora
Φ_{dob}	W	Toplinski učin ogrjevnog tijela
Φ_{isp}	W	Toplinski tok izmijenjen u isparivaču
Φ_{kond}	W	Toplinski tok izmijenjen u kondenzatoru
Φ_{izm}	W	Toplinski tok izmijenjen na površini izmjenjivača
Φ_{ptv}	W	Toplinski tok izmijenjen na površini PTV cijevi
$q_{spec,isp}$	J/kg	Specifični toplina organskog medija u isparivaču
$q_{spec,kond}$	J/kg	Specifični toplina organskog medija u kondenzatoru
$r_{isp,ORC}$	J/kg	Specifična toplina isparavanja organskog medija pri ORC režimu
$r_{isp,dt}$	J/kg	Specifična toplina isparavanja organskog medija pri DT režimu
k_{og}	W/(m ² K)	Koeficijent prolaza topline na ogrjevnom tijelu
k_{kol}	W/(m ² K)	Koeficijent prolaza topline na kolektoru
k_{isp}	W/(m ² K)	Koeficijent prolaza topline na isparivaču
k_{ptv}	W/(m ² K)	Koeficijent prolaza topline na cijevi PTV
k_{izm}	W/(m ² K)	Koeficijent prolaza topline na izmjenjivačkoj površini
k_{bit}	W/(m ² K)	Koeficijent prolaza topline na bušotinskom izmjenjivaču
λ	W/(m ² K)	Toplinska provodnost tla
c_w	J/(kgK)	Toplinski kapacitet vode
c_{org}	J/(kgK)	Toplinski kapacitet organskog fluida
c_{tlo}	J/(kgK)	Toplinski kapacitet tla
c_{zrak}	J/(kgK)	Toplinski kapacitet zraka
A_{og}	m ²	Površina ogrjevnog tijela
A_{kol}	m ²	Površina kolektorskog polja
A_{isp}	m ²	Površina izmjenjivačke površine na isparivaču
A_{ptv}	m ²	Vanjska površina PTV cijevi
A_{izm}	m ²	Vanjska površina izmjenjivača u spremniku
R_i	m	Udaljenost sloja referentne točke sloja tla od simetrale cijevi
R_{tlo}	m	Udaljenost sloja tla na kojem vrijedi izotermni rubni uvjet
f_i	-	korekcijski faktor

$H_{T,ie}$

W/K

Koeficijent transmisijskog gubitka stambenog prostora
prema vanjskom okolišu

SAŽETAK

Distribuirani izvori energije malih snaga dobivaju sve veću ulogu u suvremenim energetske sustavima. Uz već prisutna rješenja kao što su fotonaponski paneli, mikro ORC postrojenja, mali vjetroagregati i sl., sve veću pozornost dobivaju novi koncepti s mogućnošću proizvodnje toplinske i električne energije. Jedno od takvih rješenja je hibridno postrojenje kojem je cilj zadovoljavanje potrebe za grijanje tople potrošne vode i stambenog prostora te će isti biti predmet istraživanja ovog rada. Postrojenje radi u dva režima, ovisno o temperaturi spremnika topline. Postrojenje koristi solarnu energiju kao izvor energije, a spremnik topline ili bušotinski izmjenivač, ovisno o režimu, kao ponor topline. Posebna pažnja će se pridati dinamici ponora i izvora te njihovoj interakciji.

Ključne riječi: Organski Rankineov ciklus, mikrokogeneracija, dizalica topline, solarna energija, energija tla, spremnik topline

1. UVOD

U svrhu postizanja veće energetske neovisnosti i zaštite okoliša, Europska Komisija je obvezala zemlje članice Europske Unije na ispunjenje energetske ciljeve za 2020. godinu: smanjenje emisija stakleničkih plinova za 20 %, povećanje udjela obnovljivih izvora energije u finalnoj potrošnji energije za 20 % i dvadesetpostotno povećanje energetske učinkovitosti, odnosno smanjenje potrošnje primarne energije. Referentno stanje svim navedenim ciljevima su podaci iz 1990. godine. Željena razina emisija stakleničkih plinova je već postignuta, a predviđanja su kako će se i preostala dva cilja postići. Posljedično, dio zemalja članica se počelo koncentrirati na ispunjenje strategija za 2030. i 2050. godinu, čiji ciljevi su identični prethodno navedenima uz povećane postotke.

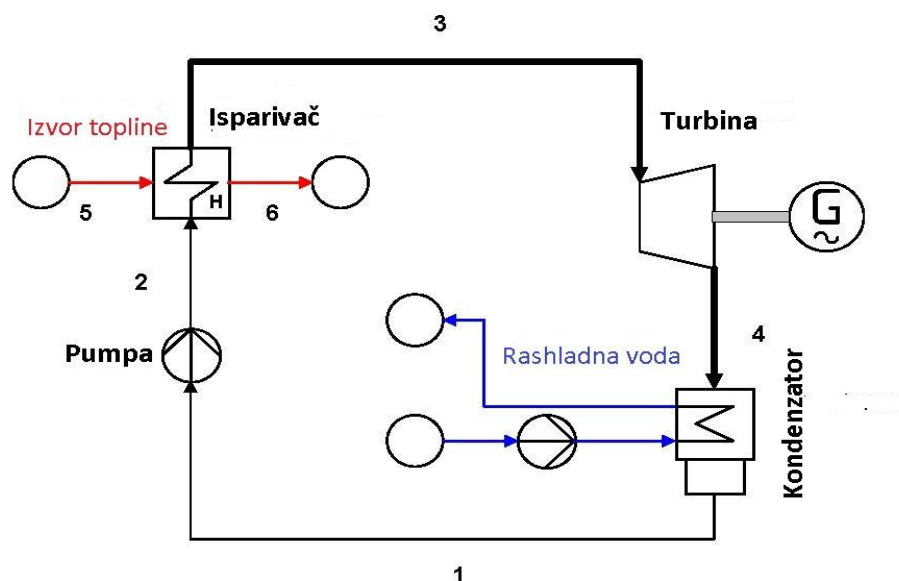
Prema podacima Eurostata, udio sektora zgradarstva u finalnoj potrošnji energije zadnjih godina se kreće oko 25 %, dok u emisijama stakleničkih plinova sektor sudjeluje iznad 10 % [1]. Takvi rezultati su potaknuli razvoj tehnologija koje bi povećale energetske učinkovitost i smanjile emisije štetnih plinova u zgradarstvu te time doprinijele postizanju europskih energetske strateških ciljeva. Jedno od rješenja tog problema su približno nulte energetske kuće. Radi se o visoko energetske učinkovitim objektima koje najveći dio svoje godišnje energetske potrebe namiruju iz vlastitog sustava proizvodnje koristeći obnovljive izvore energije. Objekti nisu izolirani od energetske mreže, već su u interakciji. U periodima manjka proizvedene energije sustav dobiva energiju iz mreže, dok u slučaju viška energije sustav šalje istu u mrežu, a interakcija se javlja kao posljedica promjene okolišnih uvjeta.

Jedna od izvedbi nulte energetske kuće su hibridna postrojenja, a upravo o takvoj vrsti postrojenja će biti govora u ovom radu gdje će se analizirati mikrokogeneracijsko postrojenje koje koristi lijevokretni i desnokretni organski Rankineov proces (ORC), solarnu energiju i bušotinski izmjenjivač.

1.1. *Organski Rankineov ciklus (ORC)*

Rankineov ciklus predstavlja niz procesa kojem je svrha generiranje električne i toplinske energije te se rad mnogih elektrana temelji upravo na njemu. Organski Rankineov ciklus je varijacija u kojoj se, umjesto vode, služi organskim medijem. Iako se ORC razlikuje po radnom mediju, način rada je identičan. Medij ulazi u isparivač gdje dolazi do promjene agregatnog stanja i pregrijava se do određene temperature. Dobivenom pregrijanom mediju se potom entalpijski pad u turbini iskorištava za dobivanje mehaničkog rada, odnosno električne energije

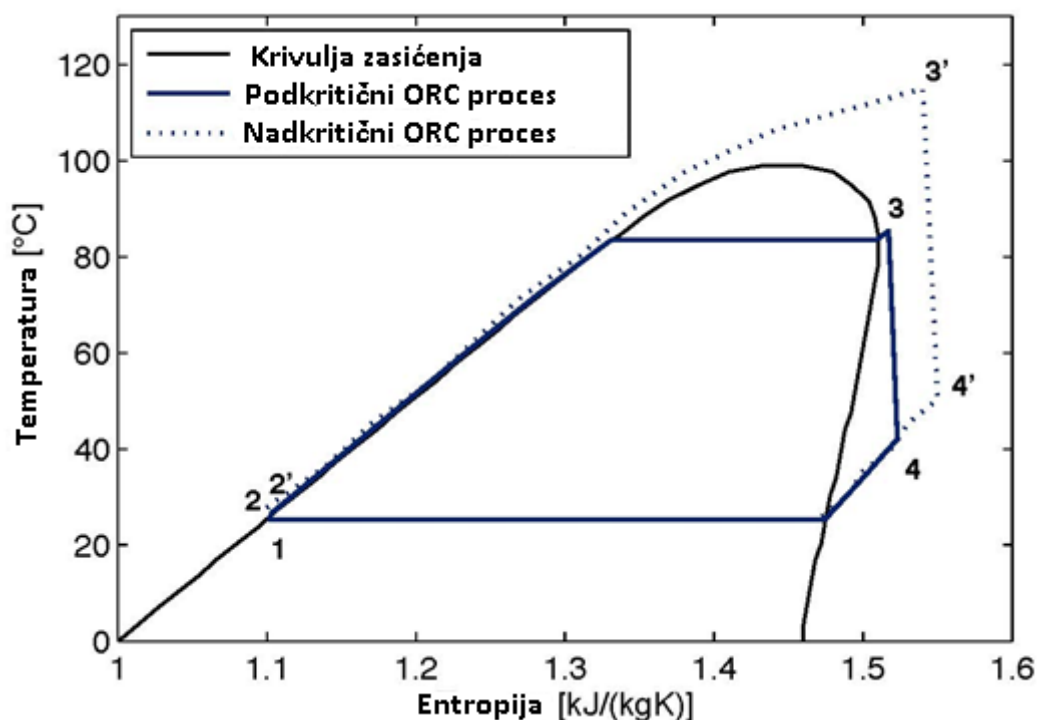
u generatoru. Nakon ekspanzije, toplinskom interakcijom rashladnog medija i radnog medija u kondenzatoru dolazi do još jedne promjene agregatnog stanja, a slijedi napojna pumpa koja vraća medij u početno stanje.



Slika 1. Shematski prikaz Rankineovog ciklusa [2]

ORC svoju primjenu nalazi u postrojenjima pogonjenu na solarnu energiju, biomasu i geotermalnim niskotemperaturnim (do 200 °C) elektranama. Prednosti korištenja istoga se nalazi u niskom vrelištu i pozitivnom nagibu gornje granične krivulje zasićenja u Ts-dijagramu. Posljedično, omogućeno je iskorištavanje niskotemperaturnih izvora energije pri povišenim tlakovima. Izuzev niskog vrelišta organskih tekućina, znatno manja specifična toplina isparavanja također ide u prilog organskim tekućinama za efikasno iskorištavanje niskotemperaturnih izvora energije (slika 2.).

Organske fluide, s obzirom na nagib gornje granične krivulje zasićenja, dijelimo na mokre, izentropske i suhe. Suhi organski fluidi imaju pozitivan nagib što im daje dodatnu prednost neograničavanja tlaka kondenzacije radi sigurnosti turbine zbog erozije lopatica. Tu prednost dijele izentropski organski fluidi čiji nagib je jednak nuli, dok mokri organski medij mora poštivati zahtjev određenog udjela kondenzata nakon ekspanzije u turbini.



Slika 2. Prikaz realnog Organskog Rankineovog ciklusa u Ts-dijagramu [2]

Pored svih prednosti, postoji nekoliko zahtjeva koje radni organski fluid mora ispuniti pri izboru radnog medija. Poželjno je da organski fluid sadrži što manji specifični volumen (odnosno veću gustoću), kako bi dimenzije sustava bile što manje, a time izvedba jeftinija. Nadalje, potreban je slabo zapaljiv i netoksičan fluid iz sigurnosnih razloga. Taj zahtjev posebice dobiva na važnosti ako se radi o primjeni u stambenim i poslovnim objektima. Od velike je važnosti da radni mediji imaju zadovoljavajuće faktore koji kvantificiraju utjecaj na okoliš - GWP (Global Warming Potential) i ODP (Ozone Depletion Potential). GWP označava utjecaj radne tvari na globalno zatopljenje te je poželjno da faktor bude što niži, dok ODP uspoređuje globalni gubitak ozona korištenjem radne tvari u odnosu na referentnu tvar triklorfluormetan (R-11 ili CFC-11) pri istoj masi te faktor mora biti jednak nuli. ODP se usko veže uz prisutnost atoma klora u molekuli, odnosno fluid ne smije sadržavati atom klora u molekuli [3]. U tablici 1. su navedeni različiti organski fluidi s pripadajućim faktorima.

Skupina	Fluid	GWP	ODP
CFC	R11	4750	1
	R12	10900	1
HCFC	R22	1790	0.055
	R141b	717	0.11
HFC	R134a	1370	0.065
	R143a	4180	0
	R245fa	1050	0
HFO	R1234yf	4	0
	R1234ze	7	0

Tablica 1. Faktori utjecaja na okoliš organskih fluida [3]

Današnja dozvoljena granica GWP-a je 150, pa jedini zadovoljavajući fluidi su iz skupine HFO (hidrofluoroolefini). Njihova zapaljivost je niska, gustoća relativno velika, a utjecaj na okoliš zanemariv. Krivulja napetosti kapljevina-para fluida R1234yf vrlo je slična onoj što pripada R134a što ga čini idealnom zamjenom [3]. Upravo radi svih navedenih karakteristika fluid R1234yf je odabran kao radna tvar u postrojenju.

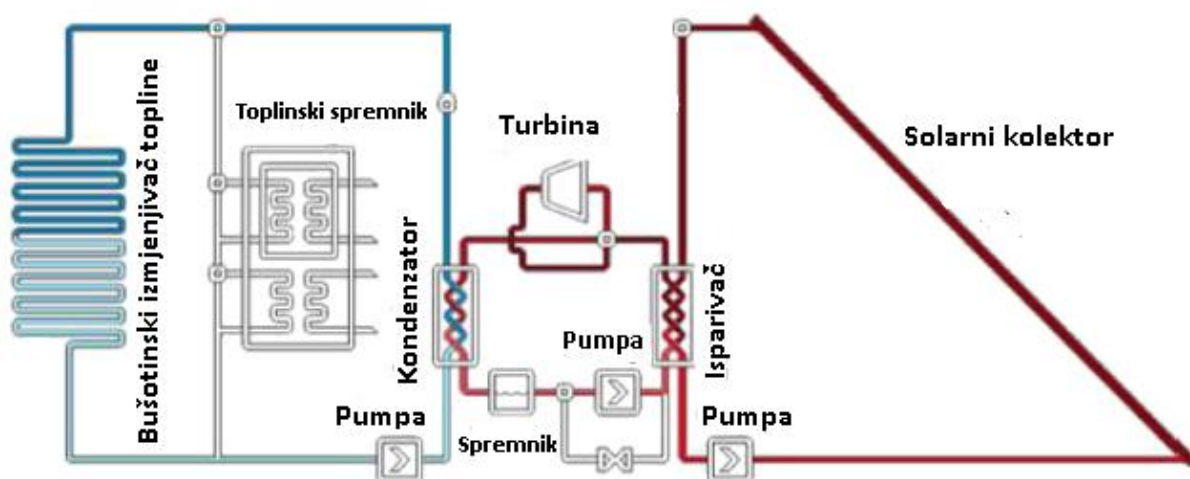
2. PROMATRANO HIBRIDNO POSTROJENJE

2.1. Opis postrojenja

Način rada sustava je preuzet iz [4]. Radi se o hibridnom postrojenju koji koristi solarni toplinski kolektor i bušotinski izmjenjivač. Sustav se sastoji od jednog kruga radne tvari (ORC krug) i dva kruga toplinskih medija (solarni krug i krug ponora topline). ORC krug se sastoji od isparivača, kondenzatora, spremnika i reverzibilne spiralne jedinice koja po potrebi postaje kompresor ili turbina. Krug ponora topline također posjeduje mehanizam mijenjanja režima ovisno o opterećenju o čemu će biti više govora kasnije u ovom poglavlju.

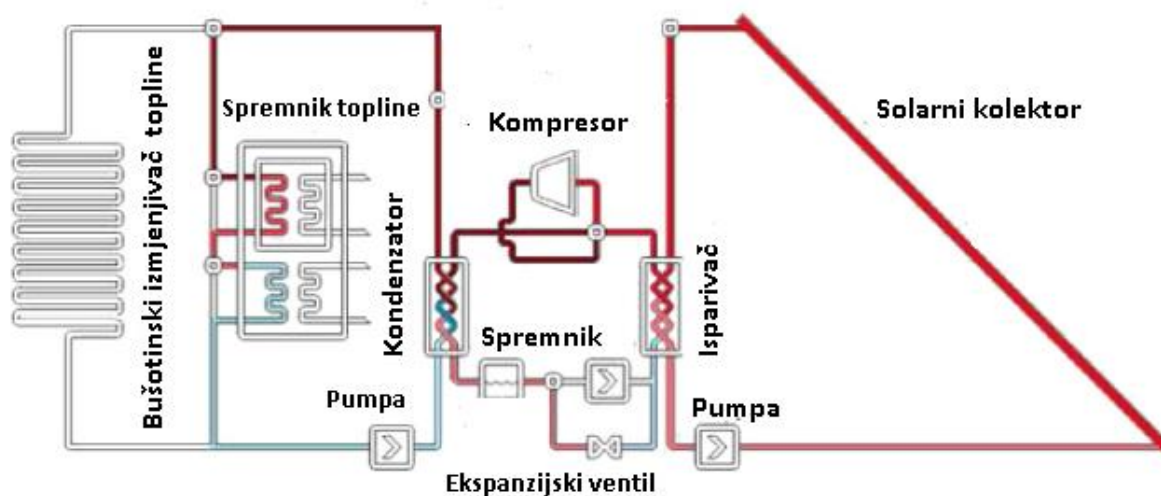
Ovisno o vanjskim okolišnim uvjetima, temperature spremnika topline i potražnji za toplinskom energijom, razlikujemo dva režima rada sustava: ORC režim i režim dizalice topline (DT).

Ako su vanjski uvjeti povoljni (insolacija i temperatura zraka), sustav će raditi u ORC režimu, pri čemu organski fluid isparava koristeći se toplinskom energijom dobivenom iz solarnih panela, nakon čega ulazi u modificiranu turbinu. Turbina služi za proizvodnju električne energije za potrebe kućanstva, a višak električne energije se šalje u mrežu. Ekspandirani fluid kondenzira u kondenzatoru hlađenim toplinskim medijem. Toplinski medij koju ulazi u kondenzator odlazi u bušotinski izmjenjivač gdje dolazi do toplinske interakcije s tlom. Na slici 3. je shematski prikazan opisani proces.



Slika 3. Shematski prikaz ORC režima[4]

Režim dizalice topline (Slika 4.) se uključuje kada direktno grijanje nije dovoljno za uspostavljanje dostatne temperature u toplinskom spremniku. Najveću ulogu pri pokretanju dizalice topline ima četveroputni ventil kod vijčane jedinice, jer se radi o ventilu odgovornom za preusmjeravanje organskog fluida te time omogućava izmjenu režima izmjejujući rad vijčane jedinice kao kompresor ili turbina. U ovom slučaju, jedinica se ponaša kao kompresor i dodatno podiže energetska razinu pregrijanog organskog fluida čime se naposljetku povećava toplinski tok predan vodi u toplinskom spremniku.



Slika 4. Shematski prikaz DT režima [4]

2.2. Spremnik topline

Spremnici toplinske energije postaju predmet sve većeg broja istraživanja i smatraju se tehnologijom budućnosti. Uloga svakog spremnika toplinske energije je spremanje viška proizvedene toplinske energije kako bi se ista koristila kasnije. Mehanizam skladištenja energije ne uključuje samo zagrijavanje, taljenje i isparavanje, već i ukrućivanje i kondenzaciju.

Atraktivnost tehnologije proizlazi iz činjenice da postoji širok spektar mogućnosti primjena, a samim time postoji širok spektar prednosti korištenja ove komponente. Spremnici energije sastavni su dio suvremenih sustava u tehnologijama grijanja prostora, grijanja potrošne tople vode, hlađenja i klimatizacije.

Jedna od prednosti korištenja promatrane komponente je povećanje proizvodnje energije. Kao što je prethodno spomenuto, toplinski spremnici pohranjuju višak energije za vrijeme niske potreba kako bi se ista koristila za vrijeme visoke potrebe za energijom, čime se povećava efikasnost proizvodnje toplinske energije. Rezultat prednosti je instalacija jedinice manjeg kapaciteta [5].

Primjenom toplinskih spremnika postiže se bolja regulacija proizvodnje električne energije u kogeneracijskim elektranama. U kogeneracijskim elektranama se učin regulira prema potrebi za toplinskom energijom. Time se, u vrijeme male električne potrošnje, proizvodi neupotrebljiv višak, jer je ovisnost proizvodnje električne energije o proizvodnji toplinske energije linearne karakteristike. Koristeći spremnik topline, proizvodnja električne energije više nema tu krutu ovisnost.

Skladištenje energije automatski implicira pouzdanost sustava [5]. Rast životnog standarda čini taj faktor vrlo bitnim prije razmatranja bilo koje tehnologije.

Budući da Sunčevo zračenje nije konstantno tijekom dana te izostaje tijekom noći, komponenta spremnika toplinske energije je neophodna za svaki sustav koji koristi solarnu energiju. Stoga, spremnik topline predstavlja posebno bitan predmet razmatranja ovog rada.

Spremnike topline prema mehanizmu skladištenja energije dijelimo na tri vrste:

- Osjetni spremnici topline
- Latentni spremnici topline
- Kemijski spremnici topline

U promatranom postrojenju se upotrebljava osjetni spremnik topline. Osjetni spremnici rade na principu promjene temperature skladišne tvari, pri čemu se dolazi do porasta unutrašnje toplinske energije, a pritom ne dolazi do promjene agregatnog stanja tvari. Kao skladišne tvari upotrebljavaju se: voda, zrak, kamenje, pijesak, ulja i ostalo. Izraz (1) predstavlja količinu pohranjene toplinske energije u određenoj tvari mase M :

$$E = M \cdot c \cdot (T_2 - T_1) = \rho \cdot V \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

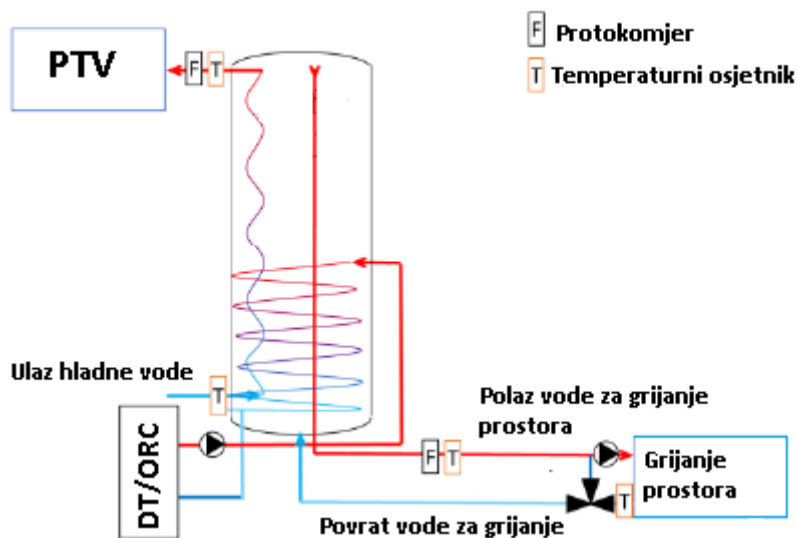
Većim volumenskim kapacitetom (ρc), skladišna tvar ima veću sposobnost skladištenja toplinske energije po volumenu i obrnuto. Budući da je svrha postrojenja grijanje prostora i

potrošne tople vode (PTV nadalje), voda se nameće kao logičan izbor radi niske cijene, visoke vrijednosti umnoška ρc i visokog koeficijenta prolaza topline.

Postoje određeni zahtjevi koje osjetni spremnici topline moraju ispuniti [5][6]:

- **Postizanje toplinske stratifikacije:** Toplinska stratifikacija je temperaturni gradijent uzduž čitave visine istog. Postizanjem stratifikacije potreban je manji spremnik što uključuje i manje toplinske gubitke. Izbor skladišne tvari ima veliki utjecaj, jer većom toplinskom provodnošću tvari smanjena je stratifikacije i obrnuto. Za postizanje zahtjeva potrebno je laminarno strujanje u spremniku kako bi se izbjegla toplinska interakcija fluida difuzijom.
- **Izbjegavanje mrtvog volumena :** Kako bi što veći volumen vode u spremniku sudjelovao u toplinskim interakcijama unutar čitavog sustava, potrebno je ulaz i izlaz vode iz spremnika postaviti na što većoj razdaljini. To je razlog uobičajenog izvođenja toplinskih spremnika tako da hladna voda ulazi na dnu spremnika.
- **Zaštita od bakterije Legionella:** Temperatura potrošne tople vode u treba što rjeđe postizati temperaturu ispod 42 °C što predstavlja gornju temperaturnu granicu idealnu za rast populacije bakterije. [7]

Izbor spremnika se temeljio na navedenim zahtjevima i na radu [6] u kojem su analizirana dva zadovoljavajuća tipa spremnika. Odabrani tip spremnika je prikazan na slici 5.



Slika 5. Spremnik topline [6]

Spremnik topline sadrži dva izmjenjivača – izmjenjivač za grijanje PTV i izmjenjivač kroz koji protječe toplinski medij. Toplinski medij ulazi po sredini toplinskog spremnika te predaje toplinu vodi u spremniku. Istovremeno, voda u toplinskom spremniku zagrijava PTV te prirodnom konvekcijom (uzrokovanom toplinskom interakcijom s toplinskim medijem) odlazi u gornje slojeve spremnika. Neposredno nakon izlaska iz spremnika se nalazi troputni miješajući ventil. Njegova uloga je regulacija polazne temperature podnog grijanja miješanjem vode iz spremnika topline i povratne vode kako bi se postigla toplinska ugodnost u stambenom prostoru i izbjegle zdravstvene poteškoće.

Dimenzije spremnika topline i pripadajućih elemenata su definirani na temelju tabličnih vrijednosti proizvođača Austria Email [8], budući da refencirajući rad također koristi podatke istog proizvođača. Izabrani volumen spremnika je 1500 l, a podaci o izmjenjivačkim površinama su prikazani u tablici 2.

	PTV	Toplinski medij
Površina izmjenjivača, m ²	7,5	3,5
Volumen unutar izmjenjivača, m ³	0,039	0.018
Koeficijet prolaza topline, W/(m ² K)	1150	1150

Tablica 2. Podaci o izmjenjivačkim površinama u spremniku topline [6][8]

2.3. Solarni toplinski kolektor

Sunce emitira elektromagnetske valove u spektru ultraljubičastih zraka, vidljivog zračenja i infracrvenog zračenja. Pritom, maksimalni intenzitet zračenja se nalazi u spektru vidljivog zračenja. Navedena činjenica, osim što je uzrok ljudskog vida, određuje način izvedbe kolektora. Sljedeća jednadžba prikazuje toplinsku bilancu zračenja Sunca prema nekom tijelu:

$$G = a * G + r * G + d * G \quad (2)$$

Apsorber (element sunčevog kolektora koji apsorbira Sunčevo zračenje) mora biti izveden na način kojim apsorbira (visok faktor a) što više solarnog zračenja, a istovremeno emitira što manje toplinskog zračenja u spektru koji se preklapa sa Sunčevim zračenjem (G). Razlog tome je stakleni pokrov kojem transmisijski faktor treba biti visok (d) za Sunčeve valne duljine, ali nizak za valne duljine koje emitira apsorber pa time ne dolazi do toplinskih gubitaka. Ipak, apsorber ne smije sadržati visok faktor emisije kako ne bi došlo do pregrijanja materijala [9].

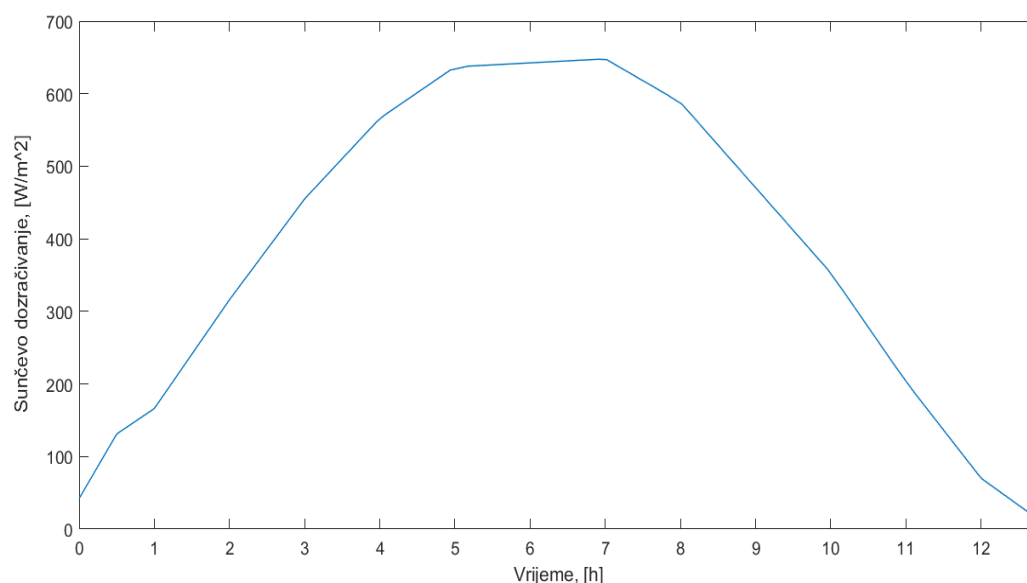
Postoje dvije vrste solarnih toplinskih kolektora: vakuumski i pločasti. U ovom radu je odabran vakuumski solarni kolektor radi njegovih boljih karakteristika tijekom prijelaznih razdoblja, odnosno pri nižoj temperaturi okoliša. Vakuumski kolektori koriste i difuzno Sunčevo zračenje, dok to nije slučaj s pločastim kolektorima. Razlog tome je vakuum koji je izvrstan toplinski izolator, pa apsorber ne predaje toplinu staklenoj cijevi konvekcijom. Nadalje, pločasti kolektori imaju veću učinkovitost samo u slučaju kada Sunčeve zrake padaju okomito na ploh što predstavlja veliki nedostatak i sadrži značajno nižu iskoristivost pri visokoj temperaturi cirkulirajućeg toplinskog medija.

Ulazni podaci kolektora su preuzeti iz kataloga proizvođača, a odabran je proizvod za koji su pružene najopširnije informacije o dimenzijama, karakteristikama i potrebnom broju serijski spojenih kolektora. Te uvjete je zadovoljio Viessmanov vakuumski kolektor Vitosol 200-T (tablica 2.).

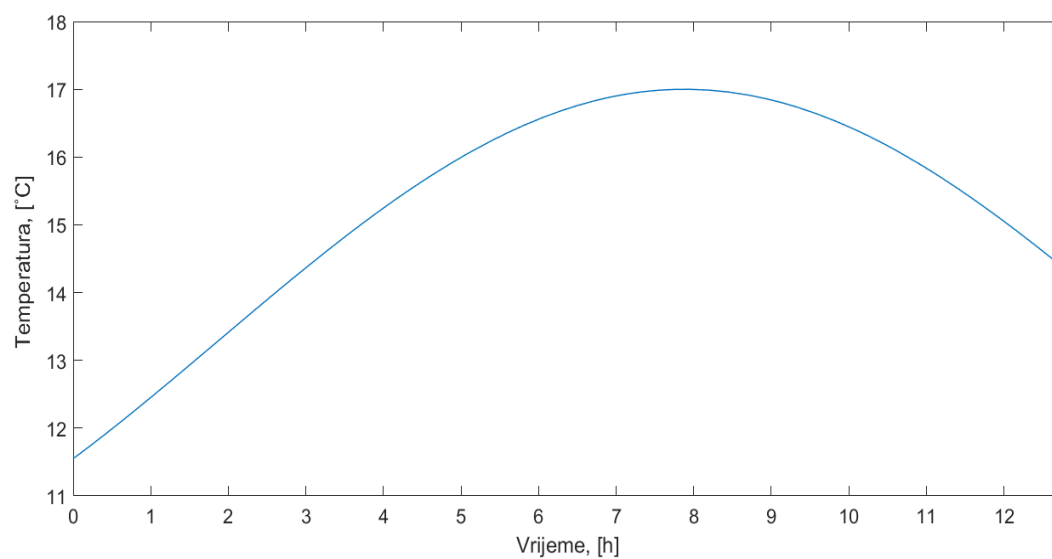
Površina apsorbera, m ²	3,07
Koeficijent gubitka topline, W/(m ² K)	1,87
Obujam toplinskog medija, l	6,2
Dopušteni pogonski tlak, bar	6

Tablica 3. Specifikacije vakuumskog kolektora Vitosol 200-T, tip SD2 [9]

Dobici na solarnom kolektoru su uzeti za referentne vrijednosti temperature i Sunčevog dozračivanja za područje Zagreba u periodu mjeseca travnja. Profili insolacije i temperature okoliša su prikazani na slikama 6. i 7.



Slika 6. Profil dnevnog dozračivanja



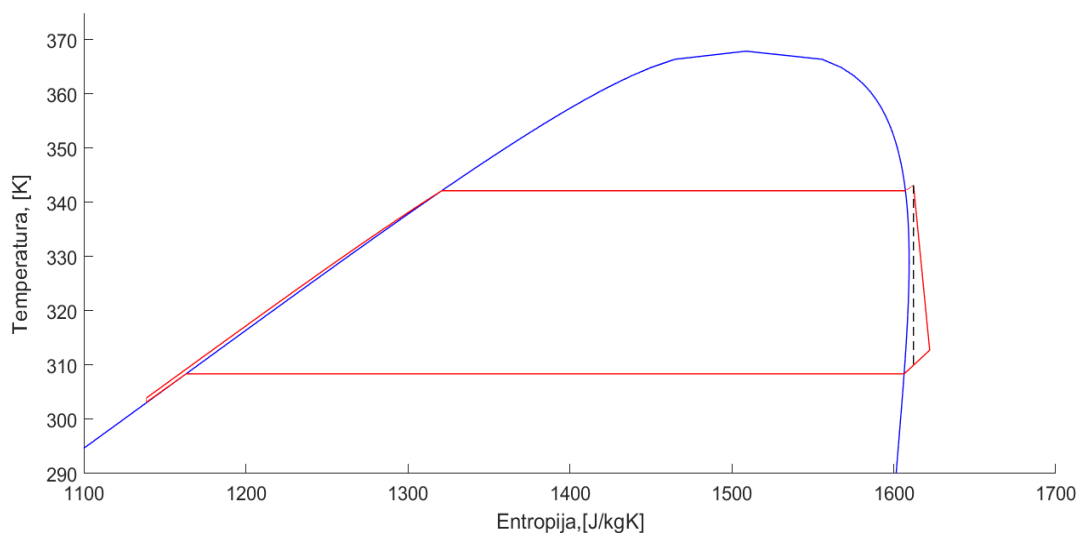
Slika 7. Dnevni profil temperature okoliša

2.4. Izmjena režima

Promjena režima se odvija pod određenim uvjetima:

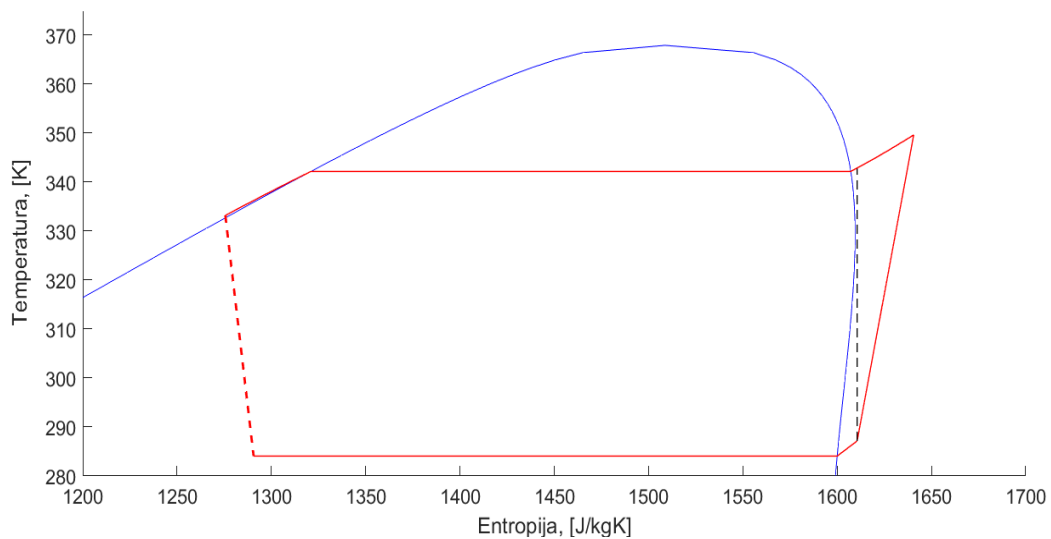
- Režim dizalice topline se uključuje kada temperatura spremnika padne ispod donje granične temperature ($\vartheta_{donja}=40^{\circ}\text{C}$), a isključuje kada temperature dosegne gornju graničnu temperaturu ($\vartheta_{gornja}=60^{\circ}\text{C}$)
- Suprotno tome, ORC režim se uključuje kada temperatura spremnika postigne gornju graničnu temperaturu, a radi sve dok temperatura spremnika ne padne ispod donje granične temperature

Radni tlakovi ORC režima su između 4.5 i 20 bara, dok DT radi između 9 i 20 bara (slike 8. i 9.)



Slika 8. Ts-dijagram ORC režima

Crtkanom linijom na slici 8. je dočarana izentropska ekspanzija u turbini čime se može uočiti nepovratnost ekspanzije.

**Slika 9. Ts-dijagram DT režima**

Crvenom crtanom linijom na slici 9. je označen proces na ekspanzijskom ventilu. Radi se o nepovratnom procesu čiji se tijek nepoznat, pa je uobičajeno takve procese drugačije označavati.

3. MATEMATIČKI MODEL HIBRIDNOG ORC POSTROJENJA

Matematički model hibridnog ORC postrojenja se sastoji od bilanci energije na solarnom kolektoru, isparivaču, kondenzatoru, spremniku topline, bušotinskom izmjenjivaču i tla. Za bilance u općem izrazu vrijedi:

$$\frac{dE}{dt} = \sum e_u - \sum e_i \quad (3)$$

Veliki broj bilanci i izmjena triju režima rezultirali su sljedećim pretpostavkama i pojednostavljenjima:

- Sve prostorije se gledaju kao jedinstvena cjelina, odnosno temperatura prostorija je jedinstvena
- U periodu kada nema Sunčevog dohračivanja na kolektor, protok toplinskog medija u krugu solarnog kolektora je jednak nuli
- U periodu kada su gubici prema okolišu veći od dobitaka uslijed Sunčevog dohračivanja, bilanca je jednaka nuli
- ORC krug je temperaturno kvazistacionarna, temperature se mijenjaju samo promjenom režima
- Koeficijenti prolaza topline su neovisni o promjeni masenog protoka
- Zanimarena toplinska stratifikacija, jedinstvena temperatura vode u toplinskom spremniku
- Zanimarene akumulacije energije u stijenama cijevi zbog visoke toplinske provodnosti
- Zanimareno zagrijavanje ploha u stambenom prostoru, zagrijava se samo zrak u prostoru
- Rubni uvjet na vanjskom segmentu tla je postavljen kao konstantna temperatura
- Adijabatsko strujanje toplinskog medija u bušotinskom izmjenjivaču topline pri povratu

3.1. Bilanca energije stambenog prostora

Projektna temperatura stambenog prostora je odabrana prema normi EN 12831 i iznosi 20 °C. Radi jednostavnosti, model stambenog prostora je izrađen uz pretpostavljene veličine ploha zidova na zadanu površinu stambenog prostora. Kako bi se uzeli u obzir i gubici prema tlu, na prozorima, vratima i krovu, gubici na vanjskim zidovima su pomnoženi s faktorom u skladu udjela gubitaka na vanjskim zidovima naspram ukupnih toplinskih gubitaka građevine. Budući da udio gubitaka na vanjskim zidovima najčešće iznosi 30-35 %, korekcijski faktor iznosi 3.

$$e_i = \Phi_i = f_i \cdot H_{T,ie} \cdot (\vartheta_{int} - \vartheta_{ok}) \quad (4)$$

Za grijanje prostora je korišteno podno grijanje zbog niske temperature toplinskog spremnika i niza drugih prednosti. Dobici na ogrjevnom tijelu se računaju prema:

$$e_u = \Phi_{dob} = k_{og} \cdot A_{og} \cdot (\vartheta_{pov} - \vartheta_{int}) \quad (5)$$

Kao što je prethodno navedeno, bilanca energije na strani stambenog prostora se promatra kroz promjenu temperature zraka u prostoru. Vrijedi:

$$\frac{dE_{zrak}}{dt} = k_{og} \cdot A_{og} \cdot (\vartheta_{pov} - \vartheta_{int}) - f_i \cdot H_{T,ie} \cdot (\vartheta_{int} - \vartheta_{ok}) \quad (6)$$

$$E_{zrak} = M_{zrak} \cdot c_{p,zrak} \cdot \vartheta_{zrak} \quad (7)$$

$$M_{zrak} \cdot c_{p,zrak} \cdot \frac{d\vartheta_{zrak}}{dt} = k_{og} \cdot A_{og} \cdot (\vartheta_{pov} - \vartheta_{int}) - f_i \cdot H_{T,ie} \cdot (\vartheta_{int} - \vartheta_{ok}) \quad (8)$$

$$M_{zrak} \cdot c_{p,zrak} \cdot \frac{d\vartheta_{zrak}}{dt} = k_{og} \cdot A_{og} \cdot (\vartheta_{pov} - \vartheta_{int}) - f_i \cdot H_{T,ie} \cdot (\vartheta_{int} - \vartheta_{ok}) \quad (9)$$

Toplinski tok predan od strane ogrjevnog medija je:

$$e_i = \Phi_{dob} = m_{og} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{pol} - \vartheta_{pov}) \quad (10)$$

Budući da je temperatura $\vartheta_{sol,2}$ definirana prema bilanci energije u solarnom kolektoru (kao što će kasnije biti opisano), temperatura $\vartheta_{sol,1}$ se dobiva prema izrazou:

$$k_{og} \cdot A_{og} \cdot (\vartheta_{pov} - \vartheta_{int}) - m_{og} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{pol} - \vartheta_{pov}) = 0 \quad (11)$$

Kao što je rečeno u poglavlju 2.2., miješajući troputni ventil se koristi za regulaciju temperature u stambenom prostoru. Miješanjem vode iz spremnika sa povratnom vodom se postiže potrebna temperatura polazne vode za održavanje projektne temperature.

$$x \cdot m_{og} \cdot c_w \cdot \vartheta_{spr} + (1 - x) \cdot m_{og} \cdot c_w \cdot \vartheta_{pov} = m_{og} \cdot c_w \cdot \vartheta_{pol} \quad (12)$$

Miješanjem istih fluida, jednačba se svodi na:

$$x \cdot \vartheta_{spr} + (1 - x) \cdot \vartheta_{pov} = \vartheta_{pol} \quad (13)$$

Na temelju jednačbi se može zaključiti kako će troputni miješajući ventil održavati konstantan maseni protok kroz ogrjevna tijela, dok će maseni protok vode iz spremnika biti promjenjiva u ovisnosti o otvorenosti ventila na strani vode iz spremnika. Otvorenost ventila prema vodi iz spremnika x se regulira pomoću PI regulatora.

3.2. Bilanca energije kruga solarnog kolektora

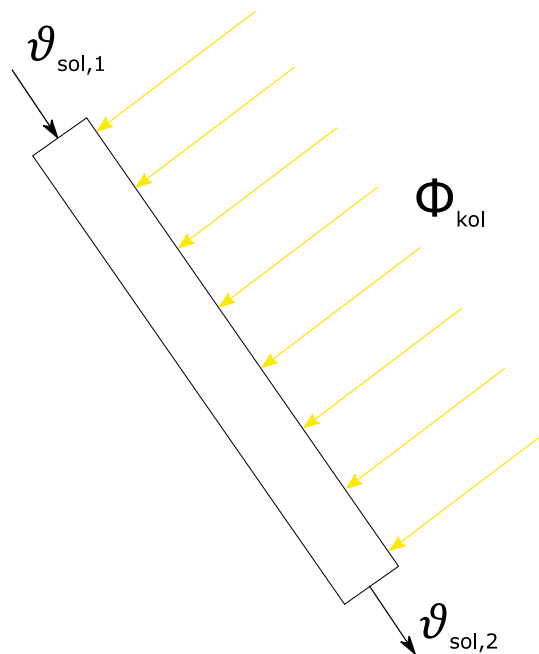
Za bilancu energije toplinskog medija na solarnom kolektoru korištena je Hottel-Whillier-Blissova jednačba:

$$\frac{dE_{kol}}{dt} = A_{kol} \cdot F_r [\tau \cdot \alpha \cdot G - k \cdot (\vartheta_{sol,1} - \vartheta_{ok})] + q_{m,sol} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{sol,2} - \vartheta_{sol,1}) \quad (14)$$

$$E_{kol} = M_{kol} c_w \vartheta_{sol,2} \quad (15)$$

$$M_{kol} c_w \frac{d\vartheta_{sol,2}}{dt} = A_{kol} [\tau \cdot \alpha \cdot G - k \cdot (\vartheta_{sol,2} - \vartheta_{ok})] + m_{sol} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{sol,2} - \vartheta_{sol,1}) \quad (16)$$

Zadana vrijednost temperature na izlazu iz solarnog kolektora se postiže PI regulatorom kojim se mijenja protok solarnog kruga. Zadanana vrijednost $\vartheta_{sol,2}$ se mijenja ovisno o režimu. Pri ORC režimu rada, vrijednost iznosi 90°C, dok za vrijeme rada dizalice topline se želi postići 75°C.



Slika 10. Solarni kolektor

Zagrijani toplinski medij u solarnom kolektoru potom ulazi u toplinsku interakciju s organskim fluidom čiji je temperaturni režim konstantan unutar pojedinog režima. Stoga, koristeći srednje logaritamske temperature isparivača definira se izlazna temperatura toplinskog medija iz isparivača, odnosno ulazna temperatura u solarni kolektor $\vartheta_{sol,1}$. Isti izrazi služe za oba režima:

$$\Phi_{isp} = k_{isp} \cdot A_{isp} \frac{(\vartheta_{sol,2} - \vartheta_{isp,2}) - (\vartheta_{sol,1} - \vartheta_{isp,1})}{\ln \left(\frac{(\vartheta_{sol,2} - \vartheta_{isp,2})}{(\vartheta_{sol,1} - \vartheta_{isp,1})} \right)} \quad (17)$$

$$\Phi_{isp} = -m_{sol} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{sol,1} - \vartheta_{sol,2}) \quad (18)$$

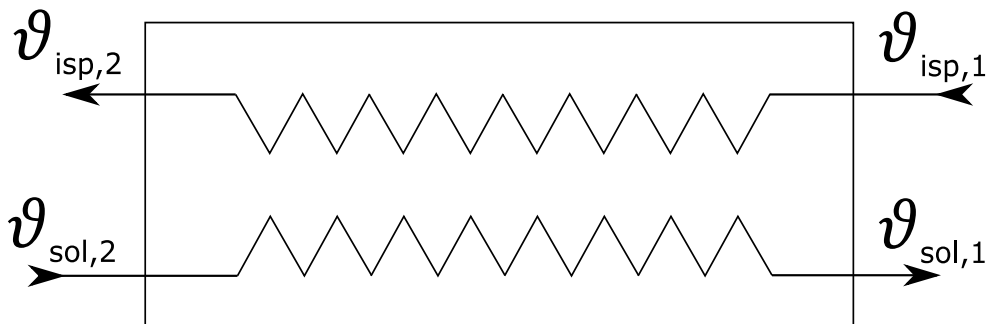
$$-m_{sol} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{sol,1} - \vartheta_{sol,2}) - k_{isp} \cdot A_{isp} \frac{(\vartheta_{sol,2} - \vartheta_{isp,2}) - (\vartheta_{sol,1} - \vartheta_{isp,1})}{\ln \left(\frac{(\vartheta_{sol,2} - \vartheta_{isp,2})}{(\vartheta_{sol,1} - \vartheta_{isp,1})} \right)} = 0 \quad (19)$$

Iterativnim postupkom se dolazi do vrijednosti izlazne temperature iz isparivača $\vartheta_{sol,1}$. Negativni predznak se koristio u svrhu naglašavanja kako toplinski medij predaje toplinu.

Izraz za taj predani toplinski tok na strani organskog fluida je slijedeći:

$$\Phi_{isp} = q_{m,org} \cdot q_{spec,isp} \quad (20)$$

Pri čemu se $q_{spec,isp}$ uvelike razlikuje ovisno o režimu.



Slika 11. Temperature organskog medija i toplinskog medija u isparivaču

Za ORC režim vrijedi:

$$q_{spec,isp} = c_{org}(\vartheta_{zas,isp} - \vartheta_{isp,1,ORC}) + r_{isp} + c_{org}(\vartheta_{isp,2,ORC} - \vartheta_{zas,isp}) \quad (21)$$

$$q_{m,org} = \frac{k_{isp} \cdot A_{isp} \frac{(\vartheta_{sol,2} - \vartheta_{isp,2,ORC}) - (\vartheta_{sol,1} - \vartheta_{isp,1,ORC})}{\ln\left(\frac{(\vartheta_{sol,2} - \vartheta_{isp,2,ORC})}{(\vartheta_{sol,1} - \vartheta_{isp,1,ORC})}\right)}}{c_{org}(\vartheta_{zas,isp} - \vartheta_{isp,1,ORC}) + r_{isp} + c_{org}(\vartheta_{isp,2,ORC} - \vartheta_{zas,isp})} \quad (22)$$

Dok za DT režim vrijedi:

$$q_{spec,isp} = r_{isp,dt} + c_{org}(\vartheta_{isp,2,dt} - \vartheta_{zas,isp,dt}) \quad (23)$$

$$m_{org} = \frac{k_{isp} \cdot A_{isp} \frac{(\vartheta_{sol,2} - \vartheta_{isp,2,dt}) - (\vartheta_{sol,1} - \vartheta_{isp,1,dt})}{\ln\left(\frac{(\vartheta_{sol,2} - \vartheta_{isp,2,dt})}{(\vartheta_{sol,1} - \vartheta_{isp,1,dt})}\right)}}{r_{isp,dt} + c_{org}(\vartheta_{isp,2,dt} - \vartheta_{zas,isp,dt})} \quad (24)$$

3.3. Bilanca energije kruga ponora topline

Krug spremnika topline sadrži dvije bilance energije. Jedna se odnosi na toplinsku interakciju u kondenzatoru, dok druga ovisi o režimu. Ako se radi o ORC režimu, tada vrijedi bilanca energije na bušotinskom izmjenjivaču, dok pri DT režimu toplinski medij prolazi kroz izmjenjivač u spremniku, pa je potrebno promatrati čitavu bilancu energije unutar spremnika.

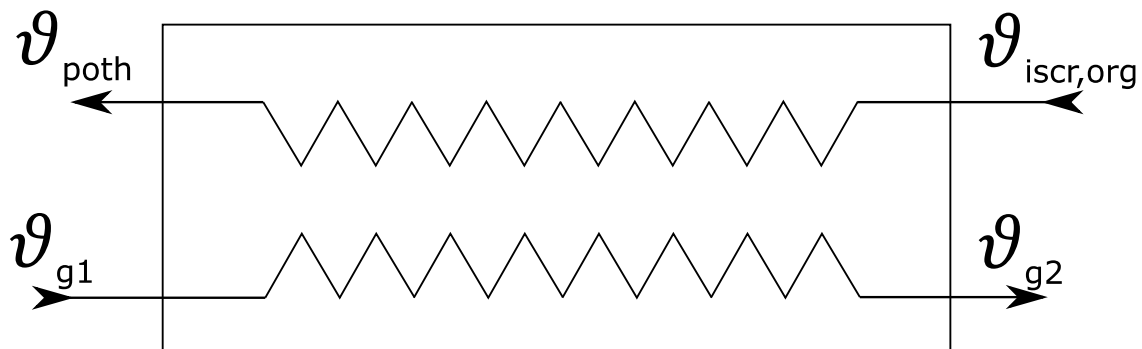
Toplinski tok izmjenjen na kondenzatoru je sljedeći:

$$\Phi_{kond} = q_{m,g} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{g,2} - \vartheta_{g,1}) \quad (25)$$

$$\Phi_{kond} = -q_{m,org} \cdot q_{spec,kond} \quad (26)$$

Pri čemu:

$$q_{spec,kond} = m_{org} c_{org} (\vartheta_{scr,org} - \vartheta_{zas,kond}) + r_{kond} + m_{org} c_{org} (\vartheta_{zas,kond} - \vartheta_{poth}) \quad (27)$$



Slika 12. Shematski prikaz kondenzatora

DT REŽIM

Ukupni toplinski dobitak vode u spremniku topline je jednaka toplinskom toku dobivenom od toplinskog medija umanjen za toplinskom toku predanom potrošnoj toploj vodi i gubicima prema okolišu.

$$e_u = \Phi_{izm} + x \cdot m_{ogr} c_w \vartheta_{pov} \quad (28)$$

$$\Phi_{izm} = k_{izm} \cdot A_{izm} \cdot (\vartheta_{g1} - \vartheta_{spr}) \quad (29)$$

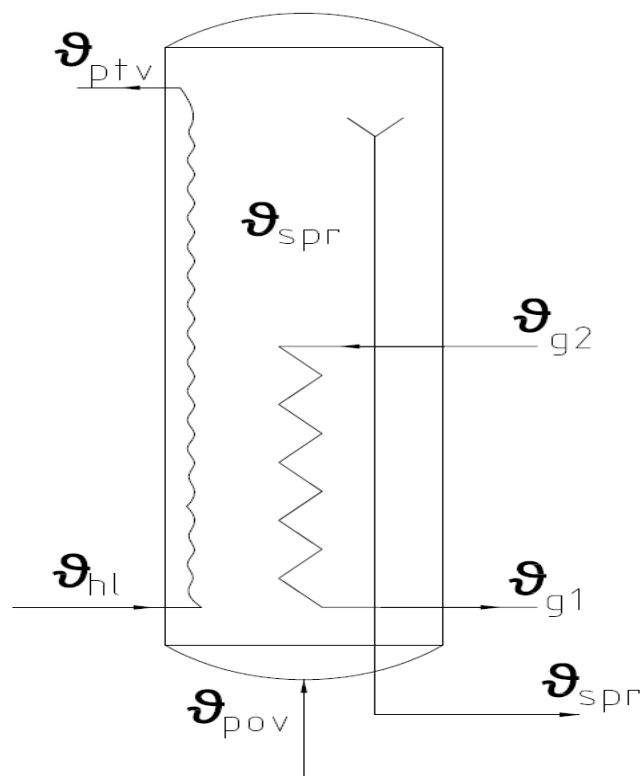
$$\sum e_i = \Phi_{ptv} + \Phi_{gub+x} \cdot m_{ogr} c_w \vartheta_{spr} \quad (30)$$

$$\Phi_{ptv} = k_{ptv} \cdot A_{ptv} \cdot (\vartheta_{spr} - \vartheta_{ptv}) \quad (31)$$

Uvrštavajući izraze (25-28) u opći izraz bilance energije:

$$\frac{dE_{spr}}{dt} = M_{spr} \cdot c_w \frac{d\vartheta_{spr}}{dt} \quad (32)$$

$$\frac{d\vartheta_{spr}}{dt} = \frac{1}{M_{spr} \cdot c_w} [k_{izm} \cdot A_{izm} \cdot (\vartheta_{g1} - \vartheta_{spr}) + x \cdot m_{ogr} c_w (\vartheta_{pov} - \vartheta_{spr}) - k_{ptv} \cdot A_{ptv} \cdot (\vartheta_{spr} - \vartheta_{ptv}) - \Phi_{gub}] \quad (33)$$



Slika 13. Spremnik topline i pripadajuće temperature

Temperatura potrošne tople vode se izračunava pomoću:

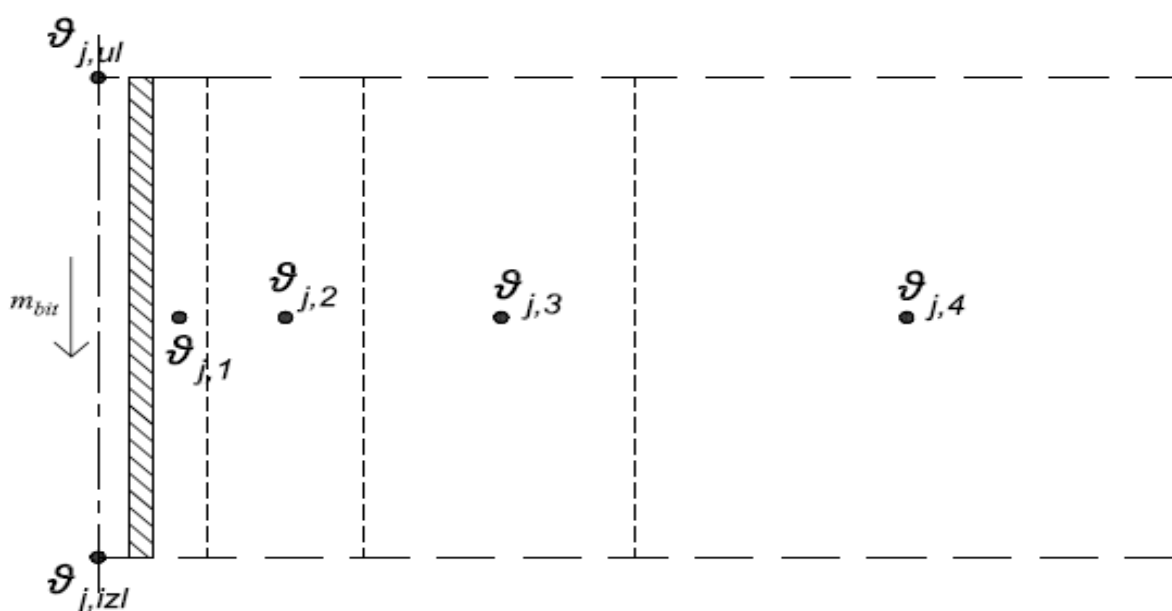
$$\frac{dE_{ptv}}{dt} = M_{ptv} c_w \frac{d\vartheta_{ptv}}{dt} = m_{ptv} \cdot c_w (\vartheta_{ptv} - \vartheta_{hl}) + \Phi_{ptv} \quad (34)$$

Dok temperatura toplinskog medija u izmjenjivaču:

$$\frac{dE_{izm}}{dt} = M_{izm} \cdot c_w \cdot \frac{d\vartheta_{g1}}{dt} = m_{ptv} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{g2} - \vartheta_{g1}) - \Phi_{izm} \quad (35)$$

ORC režim

Jedan od ciljeva ovog rada je praćenje dinamike promjene temperature tla u ovisnosti o udaljenosti sloja tla od cijevi. Kako bi tu dinamiku pratili, metodom segmentacije se model podijelio na tri dijela po visini, a tlo na 4 segmenta što sveukupno čini 12 segmenata. Tako podijeljeni slojevi tla su promatrani kao tijela s koncentriranim parametrima. Dakle, u jednoj točki (središtu sloja) se promatra promjena temperature i pretpostavlja se da vrijedi za čitav pripadajući sloj. Važno je napomenuti kako, radi prevelikog opsega, uzeta pretpostavka da toplinski medij pri povratu struji adijabatski, odnosno ne predaje toplinski tok prema tlu.



Slika 14. Prikaz j bušotinskog izmjenjivača

Temperaturu svakog segmenta se označava s oznakom $\vartheta_{j,i}$. Ako eksponentom j označimo segment podijeljen po visini cijevi, a eksponentom i segment podijeljen po debljini zemlje, vrijedi:

$$j = 1,2,3$$

$$i = 1,2,3,4$$

Bilanca energije za svaki segment tla jest:

$$\frac{dE_{j,i}}{dt} = M_{tlo,i} c_{tlo} \frac{d\vartheta_{j,i}}{dt} = e_{j,i,u} - e_{j,i,izl} \quad (36)$$

$$e_{j,i,u} = \begin{cases} k_{bit} \cdot A_{bit} \cdot (\vartheta_{j,izl} - \vartheta_{j,i}), & i = 1 \\ \frac{2\pi L(\vartheta_{j,i-1} - \vartheta_{j,i})}{\frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{R_i}{R_{i-1}}\right)}, & i = 2,3,4 \end{cases} \quad (37)$$

$$e_{j,i,izl} = \begin{cases} \frac{2\pi L(\vartheta_{j,i} - \vartheta_{j,i+1})}{\frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{R_{i+1}}{R_i}\right)}, & i = 1,2,3 \\ \frac{2\pi L(\vartheta_{j,i} - \vartheta_{tlo})}{\frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{R_{tlo}}{R_i}\right)}, & i = 4 \end{cases} \quad (38)$$

Rubni uvjet je izotermna izmjena topline na udaljenosti od $R_{tlo}=2$ m, pa tako temperatura ϑ_{tlo} uvijek ulazi u proračun s vrijednosti od 10 °C.

Na strani toplinskog medija u bušotinskom izmjenjivaču energija bilance glasi:

$$\frac{dE_{j,izl}}{dt} = M_{bit} c_w \frac{d\vartheta_{j,izl}}{dt} = m_{bit} c_w (\vartheta_{j,ul} - \vartheta_{j,izl}) - k_{bit} A_{bit} (\vartheta_{j,izl} - \vartheta_{j,1}) \quad (39)$$

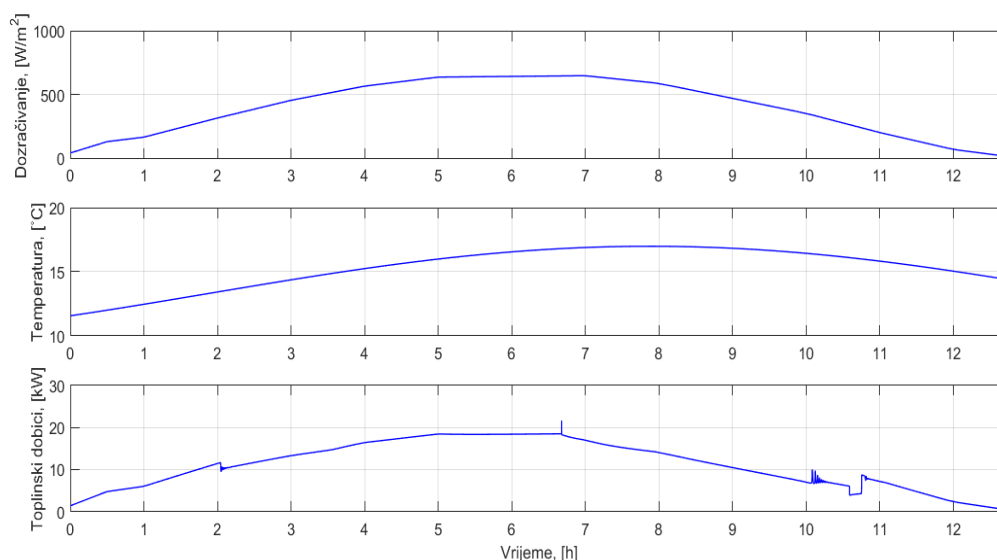
4. REZULTATI SIMULACIJE

Simulacija sustava provedena je na temelju prethodno izvedenog matematičkog modela u računalnom alatu Simulink. Program omogućuje definiranje prethodno opisanog matematičkog modela pomoću blok shema i njihovog povezivanja čime se definiraju međusobni matematički odnosi.

Središte pozornosti simulacije je ponašanje sustava u prijelaznim razdobljima u godini. U to razdoblje pripadaju mjeseci travanj, svibanj, rujan i listopad. Ipak, usporedit će se ponašanje sustava u prijelaznom razdoblju i ljeti kako bi se došlo do zaključka koliko vanjski uvjeti utječu na procese. Osim toga, razmatrat će se i utjecaj granične temperature na dobivene rezultate.

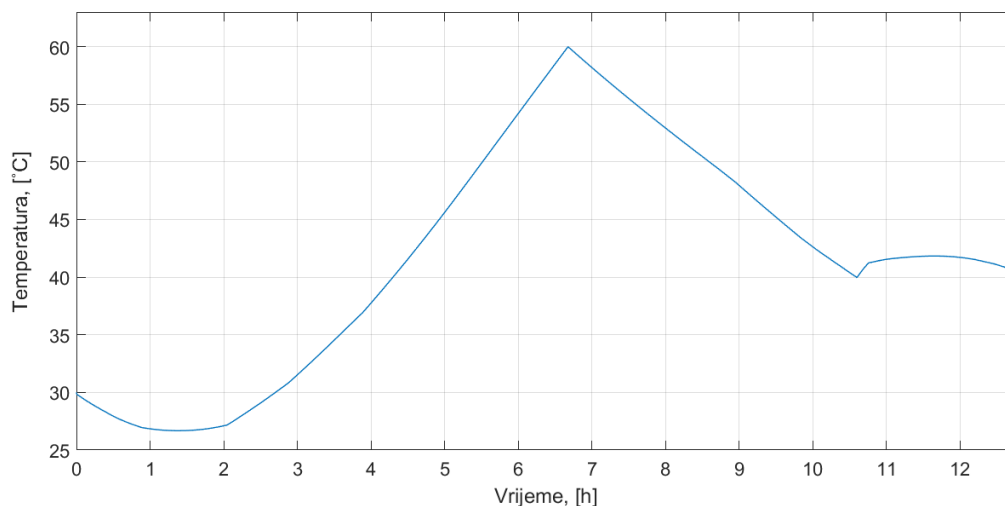
4.1. Odziv postrojenja u prijelaznom razdoblju

Za referentne vrijednosti okolišnih uvjeta (insolacija i vanjska temperatura zraka) su uzeti usrednjeni podaci iz travnja za Grad Zagreb [10]. Dijagrami okolišnih uvjeta su već prikazani u poglavlju (2.3.), a na sljedeći grafovi pokazuju njihov utjecaj na toplinske dobitke na solarnom kolektoru. Postrojenje počinje s radom nakon izlaska Sunca, a do gašenja dolazi zalaskom. Prosječno vrijeme izlaska Sunca u travnju je u 6 sati ujutro, a zalazak netom prije 19 sati. Stoga, vrijeme simulacije iznosi više od 12 sati.



Slika 15. Ovisnost toplinskog dobitka o okolišnim uvjetima

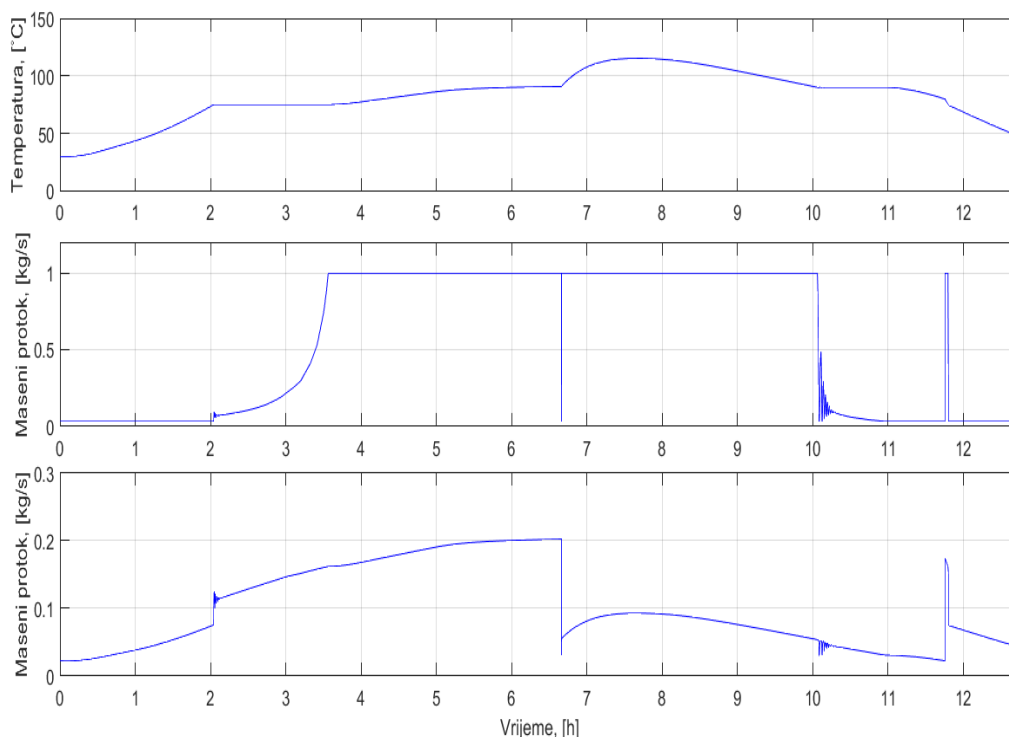
Osim okolišnih uvjeta, ponašanje sustava uvelike ovisi o postignutoj temperaturi spremnika zato što su režimi velikog broja komponenti postrojenja usko vezani uz istu.

**Slika 16. Temperatura spremnika**

ORC režim se pokreće jedanput dnevno i radi gotovo četiri sata. ORC režim se pokreće nakon 6 sati i 40 minuta (oko 12:40 h). Uspoređujući dijagram sa prethodnim, dolazi se do zaključka kako porast temperature okolišnog zraka i Sunčevog dozračivanja na solarne kolektore se podudara s porastom temperature vode u spremniku. To je sasvim logično jer temperaturni režimi ORC kruga su konstantni te većim toplinskim dobitkom na solarnom kolektoru dolazi do povećanih protoka svih krugove pa time i intenzivnija toplinska interakcija na svakoj komponenti, što će svaki od slijedećih dijagrama potkrijepiti.

Pokretanjem ORC režima dolazi do pada temperature zbog toga što toplinski medij ne prolazi kroz izmjenjivač, pa se bilanca energije na strani vode u spremniku topline sastoji samo od članova gubitka energije.

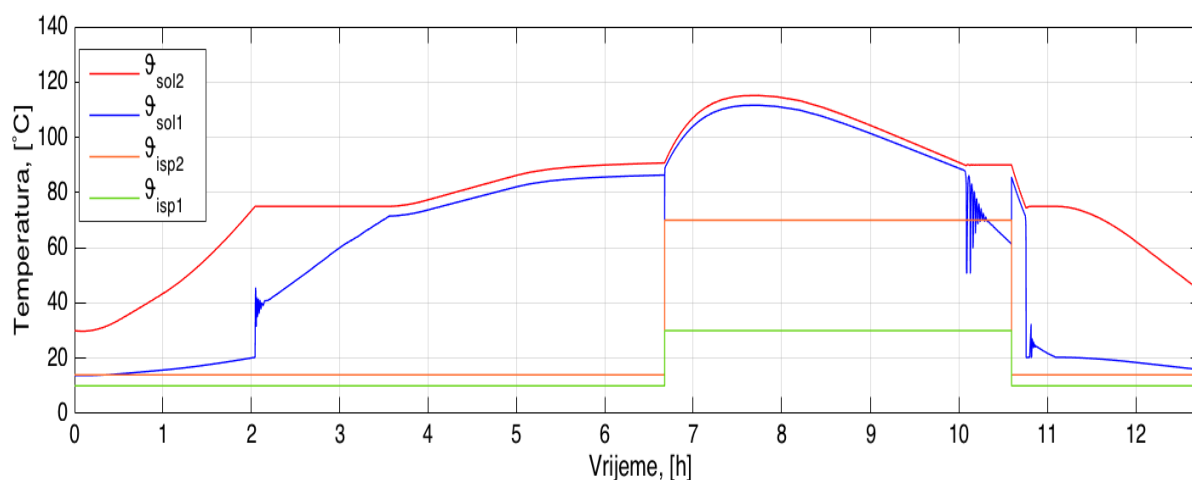
Kao što je rečeno u poglavlju 3.2., maseni protok solarnog kruga se regulira na temelju temperature postignute na solarnom kolektoru. Zadana vrijednost pri DT režimu je $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, a pri ORC režimu $90\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 17. Protoci solarnog i ORC kruga

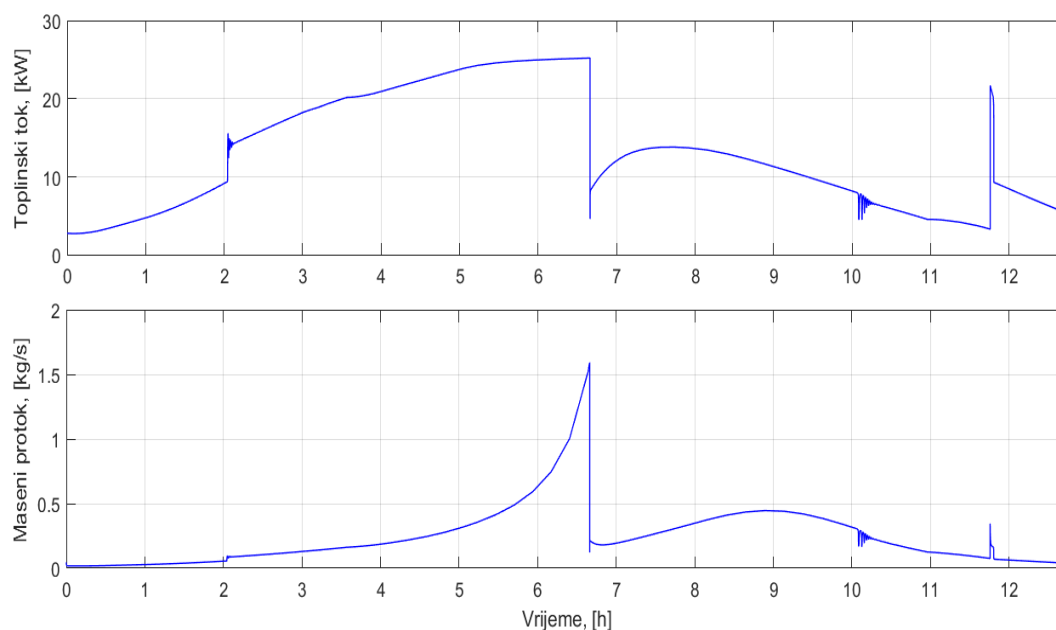
Regulator temperature u kolektoru uspješno održava temperaturu za vrijeme DT režima, no ulaskom u ORC režim zbog smanjenog toplinskog toka na isparivaču i sve većeg toplinskog dobitka na solarnom kolektoru, temperatura toplinskog medija premašuje zadanu vrijednost od $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Za održavanje te željene temperature, potrebno je uvelike povećati gornju granicu dopuštenog masenog protoka kruga solarnog kolektora, čiji je odziv prikazan na drugom grafu, no to nije potrebno s obzirom da temperatura od $118\text{ }^{\circ}\text{C}$ je zadovoljavajuća za rad čitavog postrojenja.

Ulaskom sustava u ORC režim, maseni protok ORC kruga, prikazan trećim grafom, naglo pada. Razlog tome je puno veća temperaturna razlika između organskog medija na ulazu i na izlazu iz isparivača te manja temperaturna razlika između toplinskog medija i organskog fluida.



Slika 18. Ulazne i izlazne temperature medija u isparivaču

Prijelazne pojave temperature $\theta_{sol,1}$ vidljive na grafu se pojavljuju kao posljedica brzog stacioniranja vrijednosti $\theta_{sol,2}$. Naime, posljedica te pojave će biti vidljiva i u drugim grafovima.



Slika 19. Dinamika protoka toplinskog medija

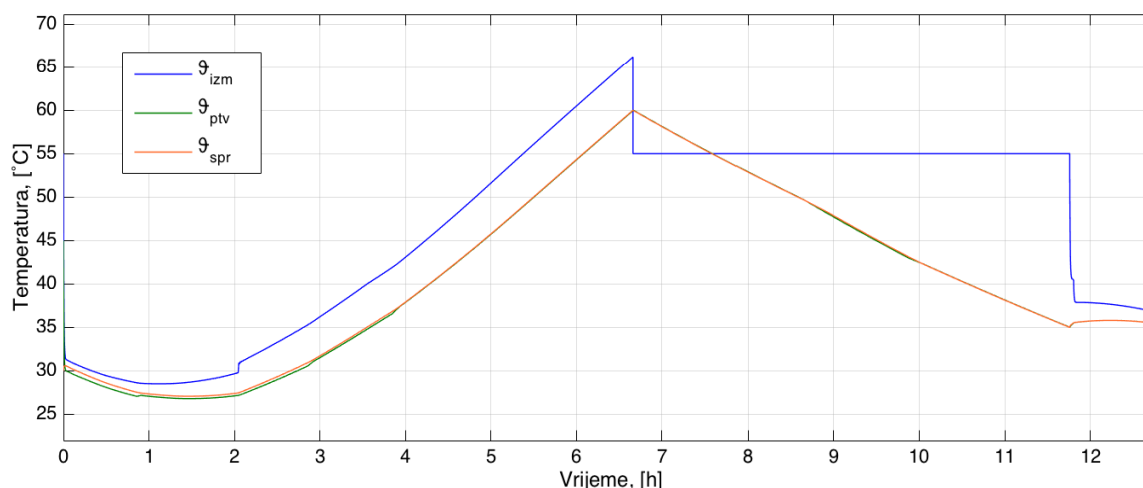
Očekivano, promjena temperaturnog režima utječe također i na izmjenu topline u kondenzatoru. Dolazi do iste pojave kao na isparivaču, fluidu kojem se predaje topline, u ovom

slučaju toplinski medij u krugu ponora topline, maseni protok naglo pada pri promjeni režima.

Toplinski tok u kondenzatoru doseže vrhunac od netom prije prije pokretanja ORC-a.

4.1.1. Odziv kruga ponora topline u DT režimu

Za vrijeme DT režima se prati dinamika procesa u spremniku topline, budući da sav maseni protok toplinskog medija prolazi kroz isti.



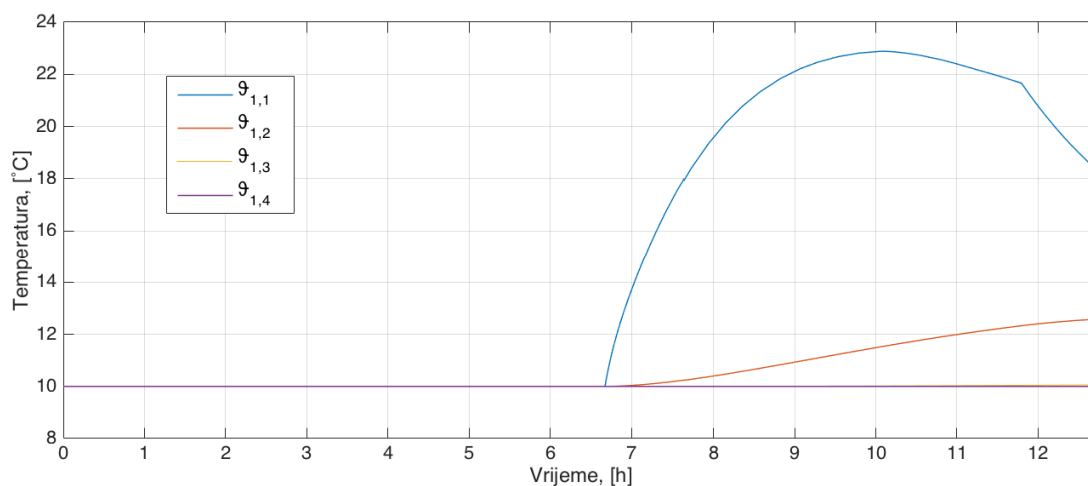
Slika 20. Dinamika procesa unutar spremnika topline

Nagli pad temperature toplinskog medija na 35 °C uvjetovan je početnim uvjetom. Naime, dinamika izmjenjivača je modelirana tako da kada nema protoka toplinskog medija kroz izmjenjivač, temperatura se „resetira“ na razinu početnog uvjeta sve dok protok ne bude veći od nule, odnosno sve dok se ne steknu uvjeti za ponovni rad DT. Naravno, u realnosti to nije takav slučaj, no takav model pruža dovoljnu točnost za promatranje dinamike vode u spremniku. Nakon što toplinski medij ponovno poteče kroz izmjenjivač, temperatura toplinskog medija u izmjenjivaču naglo raste radi ulaska velike količine energije koju unosi fluid.

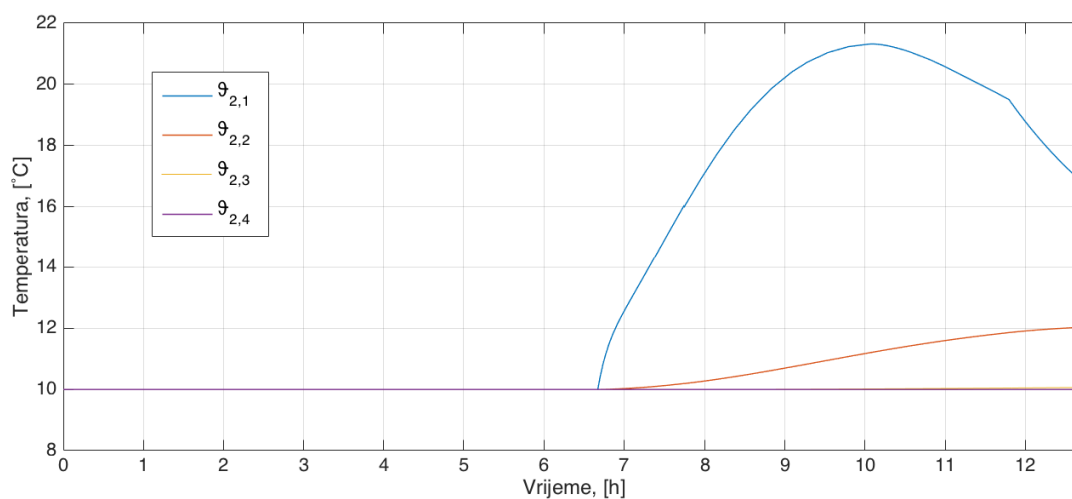
Nadalje, lako je uočiti kako se temperatura potrošne tople vode malo razlikuje od temperature vode u spremniku. Uzrok leži u činjenici da je izmjenjivačka površina PTV velika u odnosu na obujam u cijevi. Također, veliki koeficijent prolaza topline doprinosi takvom ponašanju. Idealna temperatura potrošne tople vode se kreće između 40 i 60 °C, a u taj zahtjev sustav većim dijelom vremena zadovoljava.

4.1.2. Odziv kruga ponora topline u ORC režimu

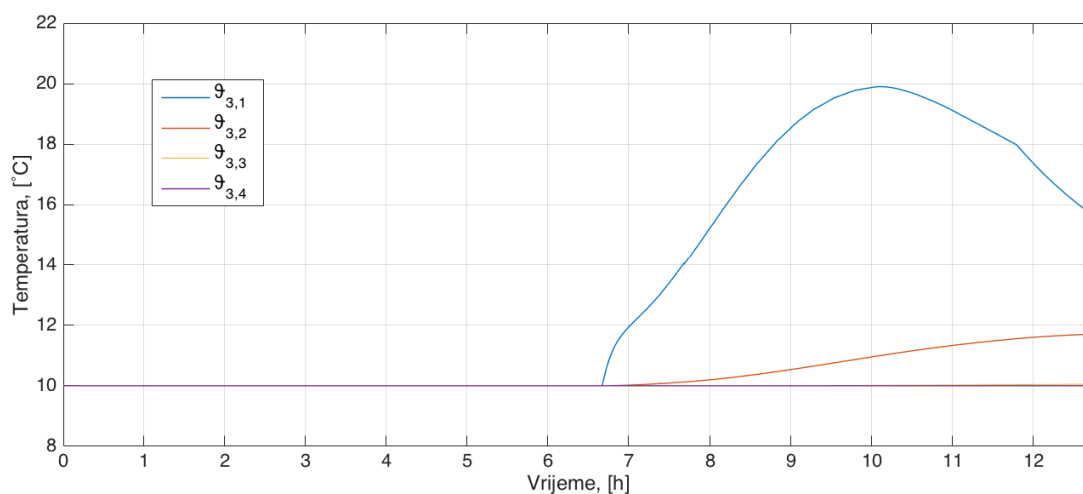
ORC režim pruža promatranje promjene toplinskog stanja tla uslijed izmjene topline pomoću bušotinskog izmjenjivača. Matematički model i predmet promatranja simulacije su opisani u poglavlju 3.3..



Slika 21. Odziv tla za segment cijevi j=1

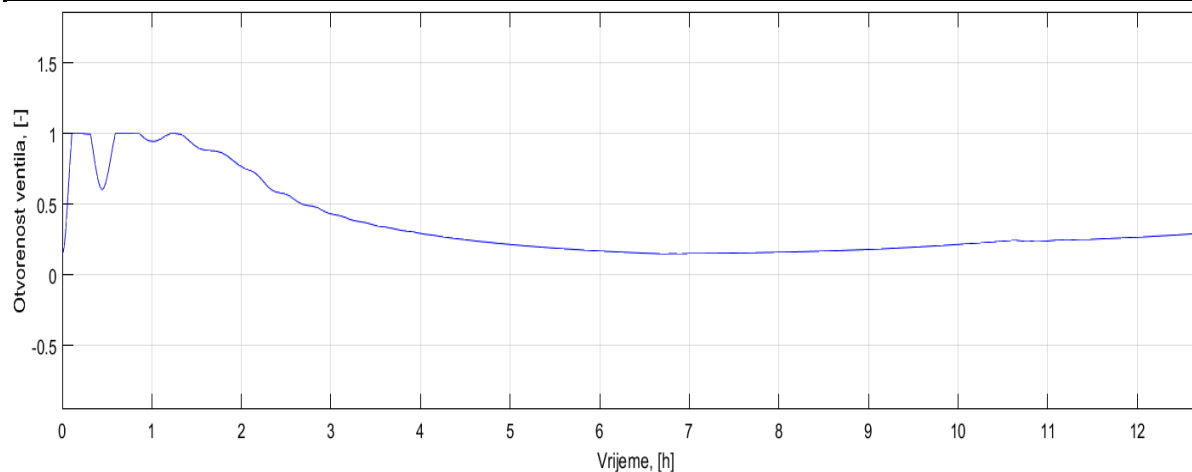


Slika 22. Odziv tla za segment cijevi j=2

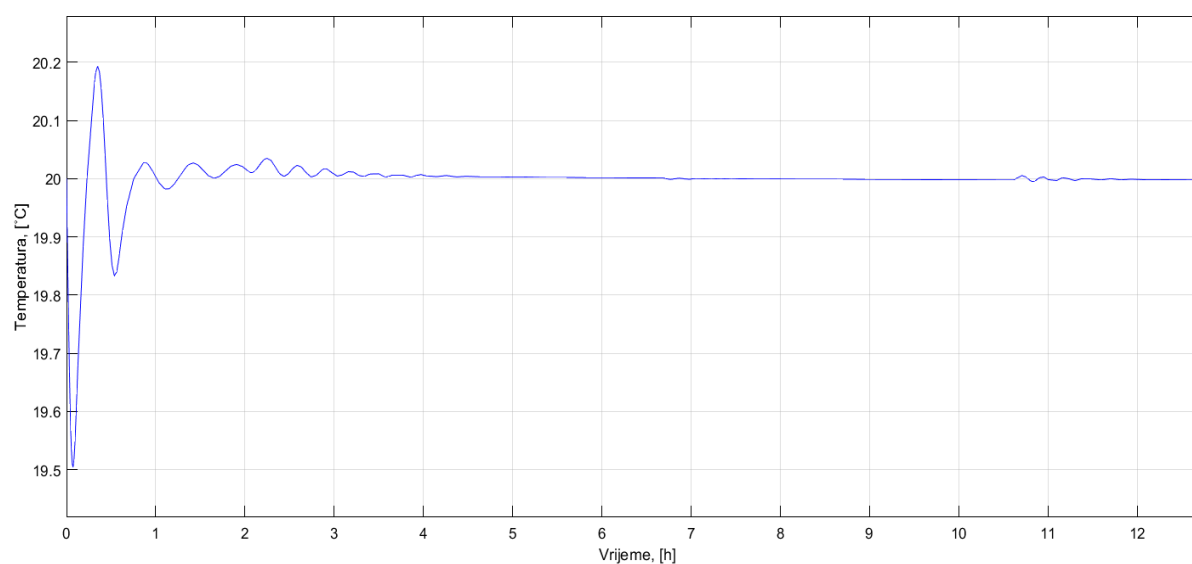
Slika 23. Odziv tla za segment cijevi $j=3$

Bez obzira o kojem se segmentu cijevi radi, odziv prati isti obrazac. Sloj uz samu cijev ima najveći temperaturni prirast. Takav sloj u prvom segmentu cijevi za 3 sata postiže prirast od 12 °C. Nakon što toplinski medij prestane strujati kroz bušotinski izmjenjivač, prvi sloj predaje toplinu drugome. Time derivacija drugog sloja ostaje pozitivna dva sata nakon prestanka rada ORC-a. U ostalim segmentima je taj prirast nešto manji zbog prethodno ohlađene vode, ali još uvijek predstavlja dominantan prirast unutar segmenta cijevi. Nakon što toplinski medij prestane strujati kroz bušotinski izmjenjivač, prvi sloj predaje toplinu drugome. Time derivacija drugog sloja ostaje pozitivna dva sata nakon prestanka rada ORC-a. Nasuprot prvom sloju, treći i četvrti sloj gotovo se ne mijenjaju. Radi se o slojevima koji sadrže veliku masu, pa samim time su tromiji.

Osim temperature potrošne tople vode, zadatak postrojenja je također postizanje toplinske ugodnosti u stambenom prostoru osiguravajući sobnu temperaturu od 20 °C, što je propisano prema normi EN 12831. Osiguravanje tog zahtjeva se provodilo pomoću troputnog miješajućeg ventila.



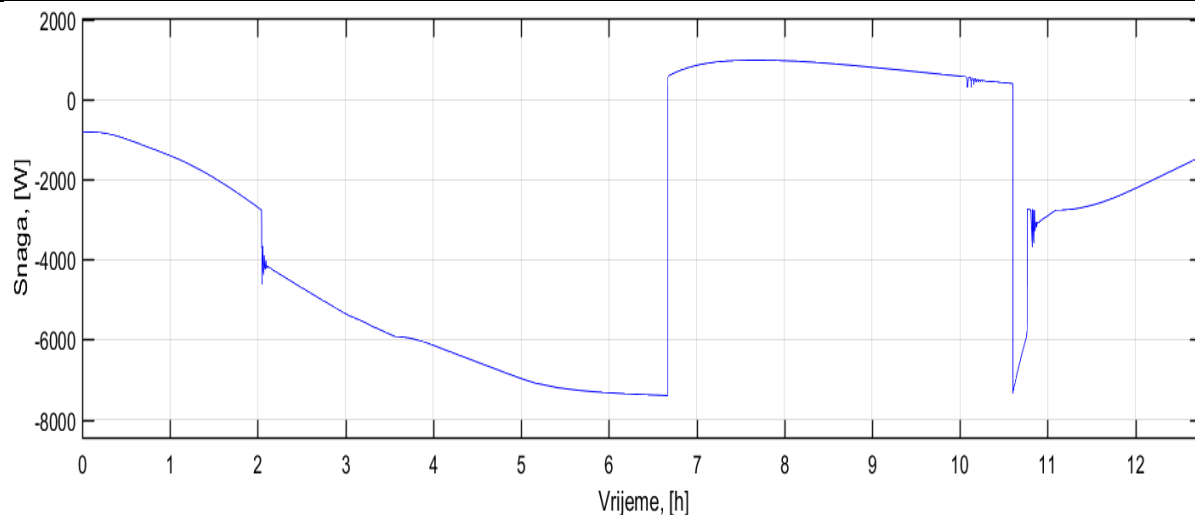
Slika 24. Otvorenost ventila



Slika 25. Regulirana sobna temperatura

Slike 24. i 25. dokazuju kako je regulacija sobne temperature uspješna. Postignuti minimum iznosi 19.5°C , dok je maksimalna temperatura 20.2°C . Oba ekstrema su postignuta u jutarnjim satima kada sustav tek počinje s radom, a početni uvjeti uvelike utječu na odziv.

Bitan faktor za ocjenu postrojenja je dnevni utrošak energije upotrijebljen za pripremu potrošne tople vode i reguliranje sobne temperature.

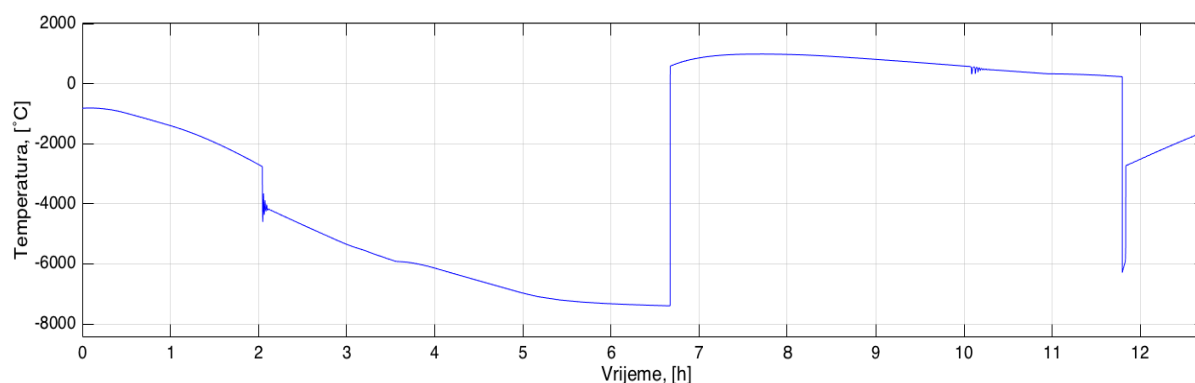


Slika 26. Utrošena/dobivena snaga sustava

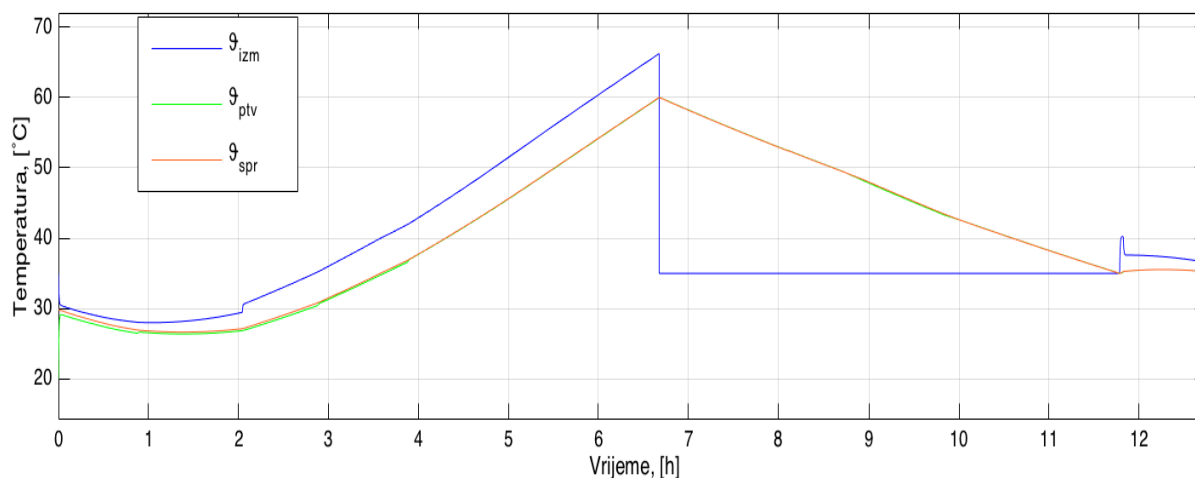
Snaga kompresora/turbine je proporcionalna s porastom protoka organskog medija. Budući da vrhunac protoka organskog medija (Slika 17.) između šestog i sedmog sata, tamo se nalazi i ekstrem utrošene snage koji iznosi 7400 W. Maksimalna snaga dobivena radom turbine iznosi 984 W. Dnevni utrošak energije postrojenja je 34.7 kWh. Preračunavanjem tog podatka kako bi dobili mjesečni pogonski trošak, za podatak jednotarifnog brojila, dobije se iznos od 540 kn.

4.2. Rezultati s promjenjenom donjom graničnom temperaturom spremnika (ϑ_{donja})

Promjenom donje granične temperature kako bi bilanca snage sustava bila povoljnija ide na štetu temperature tople potrošne vode. Naime, tom promjenom će ORC režim dulje raditi i time producirati više električne energije, ali će istovremeno temperatura PTV smanjiti te postoji mogućnost da u jutarnjim satima neće biti na zadovoljavajućoj razini. Već promjenom s 40 °C na 35 °C dolazi do značajne razlike.



Slika 27. Utrošak/dobitak snage s promjenjenom ϑ_{donja}

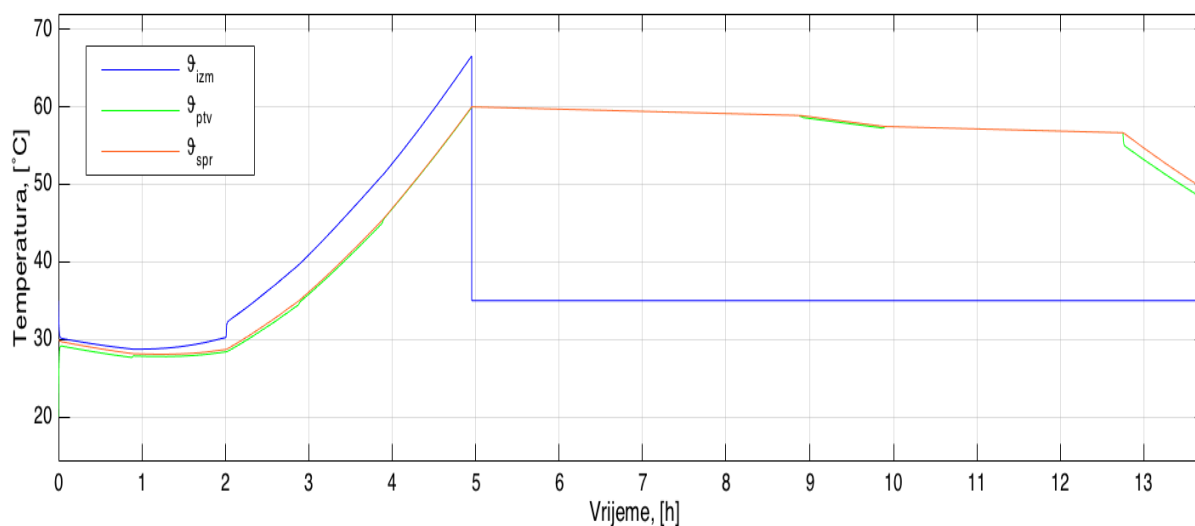


Slika 28. Dinamika u spremniku s promjenjenom ϑ_{donja}

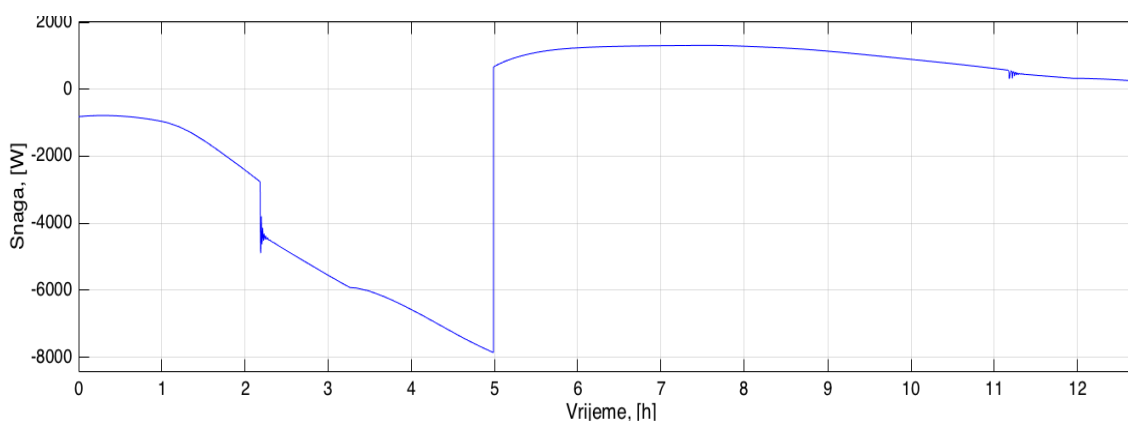
Kao što se moglo i pretpostaviti, ne postoji razlika u rezultatima sve dok se ne promjeni režim. Primjećujemo kako ORC režim je u pogonu za sat vremena duže. Time se dnevni utrošak električne energije smanjuje na 30.5 kWh, a mjesečni pogonski trošak se smanjuje za 2.18 kn. Ipak, nedostatak ove promjene je niska temperatura PTV, čiji se iznos na kraju rada postrojenja nalazi ispod 35 °C.

4.3. Usporedba rezultata dobivenih za mjesec srpanj

Veće Sunčevo dozračivanje i viša temperatura okolišnog zraka daju veće toplinske dobitke, a manje gubitke prema okolišu na solarnom kolektoru. Pretpostavka je da će postrojenje značajno duže raditi u ORC režimu, a time temperatura potrošne tople vode zadovoljavajuća kroz duži period. Simulacija je provedena za mjesec srpanj kako bi se pokazalo da okolišni uvjeti značajno utječu na rad postrojenja i dobivene rezultate. Stoga se nisu mijenjali drugi parametri osim okolišnih uvjeta i graničnih protoka, iako u stvarnosti bi se mnogi parametri morali promijeniti poput početnih uvjeta i graničnih temperatura u svrhu dobivanja optimalnih rezultata.



Slika 29. Dinamika spremnika topline s promijenjenim okolišnim uvjetima



Slika 30. Utrošena/dobivena snaga postrojenja u mjesecu srpnju

Prije interpretacije rezultata treba primjeriti kako je promatrano vrijeme simulacije povećano za više od sat vremena, budući u to vrijeme dan dulje traje. Primjećuje se kako postrojenje ulazi u ORC ranije nego u travnju, već 5 sati nakon što je ušao u pogon te ostaje u istome ostatak dana. Ukupna snaga utrošena tijekom dana iznosi 12.5 kWh, a pretpostavka se pokazala točnom jer temperatura potrošne tople vode zaista se većim dijelom dana kreće u zadovoljavajućem području. Treba napomenuti kako logičan odabir parametara, prije svega početnih uvjeta, ponudili bolje rezultate.

5. ZAKLJUČAK

Modeliranje hibridnog mikrokogeneracijskog postrojenja predstavlja kompleksan zadatak. Zbog velikog opsega i složenosti načina rada postrojenja, model je promatran uz velik broj pretpostavki i pojednostavljenja koja imaju utjecaj na rezultate simulacije. Usprkos tome, mogu se donijeti konkretni zaključci.

Rezultati su pokazali kako hibridno postrojenje može uspješno osigurati potrebnu energiju kućanstvu u prijelaznom razdoblju. Primjenom hibridnog postrojenja postiže se slaba varijacija temperature stambenog prostora oko projektne temperature, što je pokazatelj učinkovitog postizanja toplinske ugodnosti. Vrlo je bitno optimirati granične temperature spremnika topline balansirajući između što manjih pogonskih troškova i što bolje temperature potrošne tople vode. Usporedbom rada postrojenja s graničnim temperaturama od 35 °C i 40 °C prikazuje se kako smanjenjem granične temperature dolazi do malog smanjenja pogonskih troškova od 0.003 %, a temperaturna razlika iznosi više od 5°C, upravo koliko je bilo potrebno da pogon na kraju rada ostane u području potrošne tople vode. Ovisno o izvedbi i zahtjevima za potrošnom toplom vodom trebalo bi razmotriti ugradnju pomoćnog sustava grijanja.

Promatrani odziv tla navodi na zaključak da bi se skladištena energija u tlu mogla iskoristiti uz određene modifikacije postrojenja, što može biti predmet daljnjih istraživanja.

LITERATURA

- [1] Consumption of energy – Statistic explained - Eurostat, <http://ec.europa.eu/eurostat>, pristupljeno 12.1.2017.
- [2] What is an ORC power system? - KCORC, <http://www.kcorc.org/en/science-technology/what-orc-power-system/>, pristupljeno 13.1.2017.
- [3] Čehajić, Nurdin; Halilčević, Suad; Softić, Izudin. 2014. Primjena organskog Rankineovog ciklusa (ORC) i prikladni radni fluidi. *Tehnički glasnik* 8,3. 229-237
- [4] Dumont, Oliver; Lemort, Vincent. 2015. Experimental investigation of a reversible heat pump/organic Rankine cycle unit designed to be coupled with a passive house to get a Net Zero Energy Building. *International Journal of Refrigeration*. 190-203
- [5] Dincer, Ibrahim; Rosen, Marc A.. 2011. *Thermal energy storage*. Chichester
- [6] Carmo, Carolina; Dumont, Oliver; Nielsen, Mads Pagh. 2016. Energy performance and economic evaluation of heat pump/organic Rankine cycle system with sensible thermal storage.
- [7] Legionella – Wikipedia.htm, <https://en.wikipedia.org/wiki/Legionella>, pristupljeno 1.2.2017.
- [8] Austria Email, http://www.austria-email.com/fileadmin/content-en/Products/Solar_energy_system/KWS/242094-1_KWS_500-1500R_-DE-GB-F-I-ES-PL.pdf, pristupljeno 15.2.2017.
- [9] Majdandžić, Ljubomir. 2010. *Solarni sustavi*. Osijek
- [10] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>